¿SE PUEDE CURAR LA RABIA? • GENETICA DEL ALCOHOLISMO

INVESTIGACION y CIENCIA



Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

PLASMONICA

LA HUELLA DE GALAXIAS DESTRUIDAS

LA INTELIGENCIA DE LOS CUERVOS

PROCESAMIENTO VISUAL DE LA INFORMACION

LA FRAGANCIA DE LAS FLORES



JUNIO 2007
6,00 EUROS



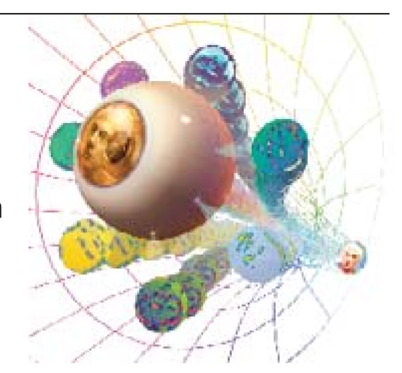
Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

Junio de 2007

Número 369















DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR EDITOR Michelle Press
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Steve Mirsky, George Musser y Christine Soares
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
GENERAL MANAGER Michael Florek
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Dean Sanderson
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Brian Napack

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca
Trigo, 39, Edif. 2
28914 Leganés (Madrid)
Teléfono 914 819 800

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

Madrid:
VdS Comunicación
Julia Domínguez
Dr. Fleming, 56 - 3.º dcha.
28036 Madrid
Tel. y fax 913 591 965
Móvil 649 879 433

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

M.ª Rosa Zapatero: *La huella de galaxias destruidas*; Luis Bou: *Plasmónica*, *Procesamiento visual de la información*; Joandomènec Ros: *La inteligencia de los cuervos*; Juan Manuel González Mañas: *¿Se puede curar la rabia?*; Ana Ferran: *La fragancia de las plantas*; J. Vilardell: *Hace...*, *Apuntes* e *Ideas aplicadas*; Marián Beltrán: *Desarrollo sostenible*; Ramón Muñoz Tapia: *Taller y laboratorio*



Portada: Phil Saunders, Space Channel Ltd.

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	100,00 euro	190,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



...cincuenta años

POLVO LUNAR. «La posibilidad real de traer material de la Luna constituye un filón científico tan atractivo, que para lograrlo ya se han trazado algunos planes ingeniosos, incluso sin necesidad de posarse en la Luna. Por ejemplo, podrían enviarse dos cohetes, uno que remolcara al otro muy de cerca mediante un dispositivo de radioguiado. El primer cohete dejaría caer sobre la Luna una pequeña bomba atómica. Como allí no hay atmósfera y la gravedad es bastante pequeña, la nube de la explosión subiría muy alto. El segundo cohete picaría al interior de la nube, recogería parte del polvo y emergería del picado mediante un propulsor a chorro auxiliar. Desde luego, una tal maniobra requeriría un guiado electrónico milagroso. —Krafft A. Ehricke y George Gamow»

TIBURÓN. «El hecho sin más es que la ferocidad del tiburón está tan bien documentada por años de experiencia, que no puede descartarse como si se tratara de una leyenda. Jacques-Yves Cousteau, el mayor de los expertos en inmersión a gran profundidad, ha informado de terribles encuentros con tiburones. Frente a las costas de las islas Cabo Verde, él y su colega buceador Frédéric Dumas se vieron acosados por un tiburón gris de dos metros y medio; se le sumaron luego otros dos de metro y medio y varios tiburones azules. La bandada se resistía a todos los intentos de repulsión; si cejaban era sólo para regresar casi al instante. Ambos emplearon todos los procedimientos de manual. Ninguno de esos trucos ahuyentaba a los animales; tampoco las bandas con 'repelente' de tiburones (acetato de cobre) que llevaban en las piernas ni el golpe que Cousteau propinó a uno de ellos en el morro con su cámara submarina cuando se acercó demasiado. Ambos buceadores lograron escapar en el último instante.»

...cien años

¿LECHE EMBOTELLADA? «La leche, el artículo alimenticio más expuesto a la contaminación, se sirve en botellas reutilizables. Una práctica nada recomendable. La solución consiste en sustituir las botellas por envases de papel de uso único. Estos ya empiezan a estar disponibles. Una de las primeras botellas que aparecerá en el mercado será un cilindro hecho con papel liso de madera de pícea con un revestimiento higiénico. Después de colocar el fondo, la botella se sumerge en parafina, la misma parafina que el ama de casa vierte sobre las mermeladas para preservarlas del aire, la humedad y el polvo.»

ENSEÑAR A LOS SORDOS. «La pérdida del sentido del oído no debe suponer necesariamente la privación de la facultad del habla. De ello no nos hemos dado cuenta hasta los últimos años. En las instituciones más modernas, el anticuado alfabeto digital es ya un desconocido. A los niños se les enseña a hablar del modo natural mediante los órganos vocales. Los cuatro o cinco años de la enseñanza primaria se dedican casi en exclusiva al aprendizaje de la lengua y los números (*véase la ilustración*).»



Enseñando a contar a un alumno sordo, 1907

...ciento cincuenta años

MOTOR ELÉCTRICO. «Admitimos que en las baterías del motor electromagnético del profesor Vergnes no pueden tener lugar explosiones como en una caldera de vapor; pero su motor no es tan sencillo ni compacto como uno de vapor, contando todas las partes de éste. El enorme motor electromagnético del Crystal Palace, del que se afirma que no llega a los 10 caballos de potencia —y del que nosotros creemos, por simple observación de su funcionamiento, que no llega a los cinco—, con una batería eléctrica de 128 vasos, ocupa más espacio (entre motor y batería) que muchos motores de vapor que rinden hasta 20 caballos de potencia.»

GAS QUE SE ESCAPA. «Los globos de juguete en miniatura (hechos de intestino de vaca) que con tanto éxito se presentaron en París durante las vacaciones del invierno pasado podrían convertirse en unos bellos y agradables juguetes para las delicias de la joven América. Hace muy poco que se han puesto en circulación; ya pueden verse en los escaparates de las tiendas de nuestra ciudad. A los niños que los han adquirido les ha sorprendido ver que a diario reducían su tamaño, les salían arrugas prematuras, para finalmente dejar de flotar en el aire. La causa es la fuga del gas de relleno (hidrógeno) a través de los poros del globo.»

APUNTES

GEOMETRIA

Cuasicristales medievales

Los artistas islámicos medievales llegaron a diseñar cuasicristales casi perfectos, un complejo patrón geométrico que descubrió —o más bien redescubrió, según lo que se cuenta a continuación— el físico y matemático Roger Penrose en el decenio de 1970. Peter J. Lu, físico, estudiante de doctorado en Harvard, vio en Uzbekistán teselados con características que parecían propias de cuasicristales. Un examen de numerosas fotografías de Irán, Irak, Turquía y Afganistán le condujo, con la colaboración del cosmólogo y experto en cuasicristales Paul. J. Steinhardt, de Princeton, a descubrir que a partir de 1200 se construyeron en esa zona mosaicos arquitectónicos —*girih*— mediante la combinación de cinco tipos de tesela: pajarita, pentágono, diamante, hexágono alongado y decágono. El nuevo método permitió concebir patrones periódicos más complicados. En el santuario Darb-i-Imam, o santuario de los imanes, del siglo XV, en la ciudad iraní de Isfahán, el teselado es traslacionalmente cuasiperiódico: las frecuencias con que aparecen los distintos tipos de teselas no forman entre sí cocientes de números enteros. Esta ordenación permite simetrías rotacionales prohibidas cristalográficamente. Y estas son, precisamente, las características que definen a un cuasicristal. *—J. R. Minkel*



En Oriente Medio se crearon a finales de la Edad Media mosaicos con singulares propiedades geométricas

EPIDEMIAS

Los niños, primero



Cuando amenaza una epidemia de gripe, la recomendación tradicional es que se vacune antes a los de más edad, pues son quienes más riesgo corren de morir si se infectan. Nuevas pruebas sugieren que debe darse prioridad a los más jóvenes. Investigaciones de las universidades de Yale y Rutgers subrayan que los niños son el grupo que más contribuye a la propagación de la gripe: transportan el virus a los hogares e infectan a los adultos, quienes luego lo trasladan a los sitios de trabajo. Vacunando a la mayoría de la población infantil se eliminaría prácticamente la gripe, reduciéndose así la mortalidad entre los ancianos, los niños y la población en general.

—Charles Q. Choi

Los niños son los vectores principales de la gripe

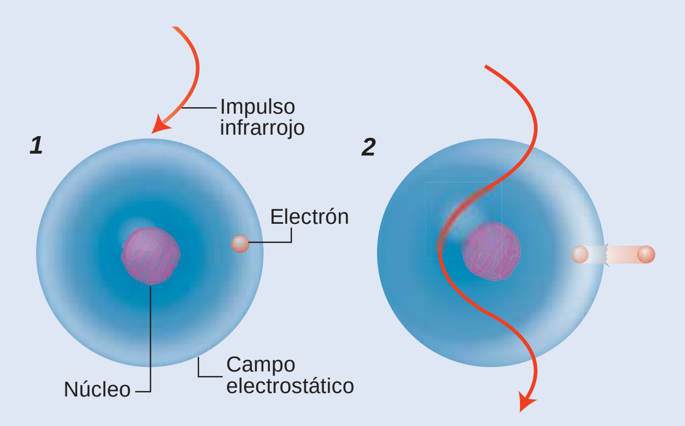
CORTESIA DE W. B. DENNY (*mosaico*); GETTY IMAGES (*niños*); LUCY READING-IKKANDA (*átomos*)

FISICA

Ionización por efecto túnel

Para liberarse del átomo, el electrón, dotado de carga negativa, tiene que absorber un fotón de alta energía; por un ejemplo, un fotón de la región ultravioleta (UV) o de rayos X del espectro. De ese modo, el electrón adquiere un estado excitado, suficiente para vencer la atracción electrostática que lo sujeta al núcleo, dotado de carga positiva, y escapa. Se trata de un proceso de ionización. Un equipo germano-holandés ha aportado la primera prueba directa de la existencia de un mecanismo alternativo del mismo proceso. Se recurre a poderosos campos eléctricos procedentes de un intenso pulso de láser, que, de forma transitoria, debilita los enlaces electrostáticos y permite que el electrón escape gracias a un efecto túnel mecanocuántico.

Leonid Keldysh, ahora en el Instituto Lebedev de Física de Moscú, predijo el efecto en cuestión en 1964. Los experimentos habían demostrado la realidad de esa ionización insólita. Pero hasta el advenimiento de los pulsos de láser que perduran escasos centenares de attosegundos los físicos no pudieron observar el fenómeno. (Un attosegundo es 10^{-18}



Túnel hacia la libertad: Cuando un fotón infrarrojo golpea un átomo (*1*), su campo eléctrico distorsiona y debilita el campo electrostático del átomo por un lado. Con ello, permite que el electrón escape por efecto túnel (*2*)

VISION

Arco iris para roedores

Los ratones, como la mayoría de los mamíferos, ven el mundo sólo en amarillos, azules y grises. Lo mismo que las personas que padecen de discromatopsia del rojo-verde. Introduciendo un gen humano en ratones, se ha dotado a esos múridos de una visión completa del color. Los hombre y los primates que con ellos guardan mayor parentesco poseen un pigmento extrasensible a la luz que les permite ver el rojo. (Los mamíferos cromosensibles presentan dos pigmentos por lo menos, para el azul y para el verde.) En un trabajo realizado por investigadores de la Universidad de California en Santa Bárbara, se insertó el gen de ese pigmento extra en el cromosoma X del ratón. Aun cuando los cerebros de los roedores no habían evolucionado hasta el punto de emplear tales señales, sí se mostraron capaces de reordenar sus las conexiones nerviosas que precisaban para discriminar correctamente entre distintas luces de colores, que les suponía una recompensa en leche y soja. Este descubrimiento podría ayudar a explicar de qué modo evolucionó la visión del color en el hombre.

—Charles Q. Choi

PALEONTOLOGIA

Colágeno de un *T. rex*

Se ha extraído colágeno de un fémur de *Tyrannosaurus rex* de hace 68 millones de años. En 2005 se descubrió la existencia de tejido blando en el mismo. El análisis químico de la proteína reveló siete secuencias de una longitud de unos 10 a 20 aminoácidos. De esas secuencias, tres coincidían con segmentos peptídicos de colágeno de pollo, una con el de una rana y otra con el de una salamandra; las otras dos encajaban con las de múltiples organismos, pollos y salamandras entre ellos. Los resultados refuerzan la conexión entre los dinosaurios y las aves y descartan la tesis de que los fósiles no pueden aportar muestras de proteínas para su estudio. El material genético, no obstante, se degradó hace mucho. Entre las lecciones a extraer, una crucial: ese tipo de trabajos nos revelan pautas sobre cambio, dirección y velocidad de la evolución molecular.

—Nikhil Swaminathan



Erratum corrige

En la revista de abril 2007, núm. 367, en la sección "Ciencia y gastronomía", donde dice "legumbres" léase "hortalizas".

segundos.) Los pulsos de láser de esa duración habían posibilitado sondear el movimiento de los electrones en átomos y moléculas. Se espera que, con el refinamiento de la técnica se consiga seguir la huella del movimiento de los electrones desarrollado durante las reacciones químicas.

Ferenc Krausz y su grupo, del Instituto Max Planck de Optica Cuántica en Garching, acaban de hacer públicos los resultados de sus experimentos sobre ionización. El equipo disparó, contra una nube de átomos de gas neón, un pulso de láser ultravioleta de 250 attosegundos para alejar del núcleo un electrón. Casi a la vez lanzaron un pulso infrarrojo de 5000 attosegundos de duración, cuyo campo eléctrico oscila sólo unos pocos ciclos. El campo debilitó la fuerza electrostática y permitió que el electrón relajado escapara por efecto túnel, como hacen las partículas cuánticas ante una barrera sutil. Aumentando de forma paulatina y discreta el intervalo entre los pulsos UV y pulsos infrarrojos, se descubrió que la formación de iones de neón crecía a su vez, señal clara de que siempre que el campo eléctrico del pulso de un láser infrarrojo alcanzaba un máximo, aumentaba en paralelo la tasa de creación de iones.

La teoría de Keldysh sobre la ionización del campo fuerte ha sido incardinada a muchas otras teorías, un resultado que no debe sorprendernos. El equipo de Krausz ha demostrado una forma nueva de medir la dinámica del electrón. Merced a dicha técnica podríamos bucear en otros procesos mal conocidos en los que los electrones intercambian energía en el seno del átomo.

A este respecto, Krausz apela a lo que acontece cuando en los átomos un fotón de rayos X desaloja un electrón de la vecindad del núcleo. Mientras escapa, ese electrón podría comunicar parte de su energía a otro electrón, que entonces adquiere el estado excitado y se aleja todavía más del núcleo. Por ello, entre la absorción del fotón X por el electrón expulsado y el cambio de estado del segundo electrón podría existir un pequeño retraso, quizá de unos 50 attosegundos. No importa tanto la duración exacta, cuanto la realidad de la propia demora. Un retraso significaría que el segundo electrón ganó energía del primero. Ya se han conseguido pulsos UV de 100 attosegundos, por lo que podría no tardarse en hallar la respuesta.

—Alexander Hellemans

La huella de galaxias destruidas

Las estrellas con movimiento anómalo podrían ser los restos de antiguas galaxias devoradas por la Vía Láctea

Rodrigo Ibata y Brad Gibson

Las estrellas que percibimos en el cielo nocturno pertenecen a nuestra propia galaxia, la Vía Láctea. La galaxia grande más próxima, Andrómeda, está a más de dos millones de años-luz de distancia, unas 20 veces el diámetro del disco principal de la Vía Láctea. A simple vista resulta imposible distinguir sus estrellas; se confunden en una vaga nebulosidad. Por lo que respecta a la Vía Láctea, es como si existiesen en un universo aparte. En cambio, las estrellas visibles del firmamento se nos presentan como soles de nuestro mundo, nacidos y criados dentro de los confines de la galaxia.

Pero entonces, ¿qué pensaremos de Arturo, la segunda estrella más brillante del cielo boreal? Se mueve de manera diferente de la mayoría de las estrellas de la Vía Láctea y tampoco coincide en composición química con ellas; comparte, sin embargo, características singulares con algunas estrellas peculiares, dispersas por la galaxia. Se debate acerca del origen de estos y otros astros atípicos desde hace cuarenta años. ¿Los llevó la gravedad de los brazos espirales de la galaxia a sus extrañas órbitas? ¿Se trata de inmigrantes nacidos más allá de la Vía Láctea, hechos, pues, de materiales que no formaban parte de nuestra galaxia?



MUEREN POR CONSTRUIR LA VIA LACTEA. Nuestra galaxia ha disgregado cientos de galaxias pequeñas. Las convierte primero en tenues corrientes de estrellas, que poco a poco se mezclan con la población indígena de la Vía Láctea. La Vía Láctea está ahora desmembrando la galaxia enana Sagitario. La corriente (*color dorado*) que se ha creado rodea el disco central de la Galaxia.

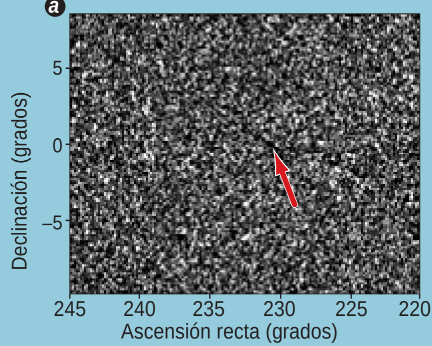
DON DIXON

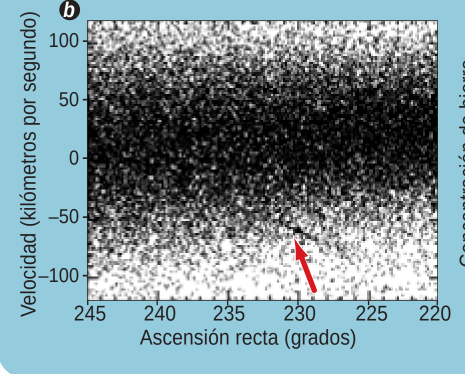
Con la aplicación de refinadas técnicas para el descubrimiento de pruebas ocultas, similares a las empleadas en otras ramas de la ciencia, se ha comprobado hace poco que la segunda hipótesis es la cierta. Algunas estrellas nacidas en la Vía Láctea han tenido desde un principio, o han acabado por adquirir, órbitas peculiares. Pero un número muy alto de estrellas anómalas, Arturo entre ellas, son inmigrantes. “Secuestradas” o “subyugadas” serían quizá metáforas mejores que “inmigrantes”: se cree que se trata de estrellas nacidas en galaxias más pequeñas que la Vía Láctea, que ésta apresó, esquilmó y absorbió.

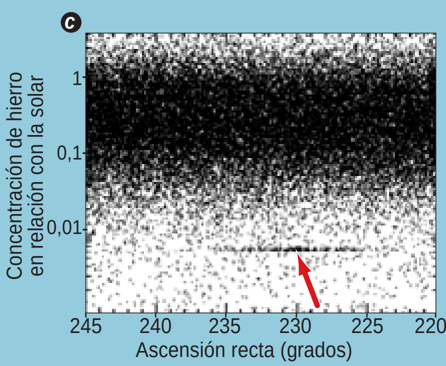
En el transcurso del tiempo, nuestra galaxia ha venido sometiendo a cientos de galaxias vecinas. Las estrellas que las componían sobreviven todavía, entremezcladas con las nativas de la Vía Láctea, aunque apenas conservan una memoria borrosa de su origen. Dar con esas estrellas nos ayuda a reconstruir la violenta historia de nuestra propia galaxia y a desenterrar su secreto más oculto: la naturaleza de la invisible materia oscura que gobierna su existencia.

Perdidas entre la muchedumbre

Una corriente estelar puede confundirse por completo con el fondo constituido por las estrellas originarias de la Vía Láctea (*a*). Pero por su velocidad (*b*) y composición (*c*), la corriente se hace, sin embargo, visible. Esta figura es un modelo de la región del cielo alrededor de la corriente Palomar 5. (La ascensión recta y la declinación son coordenadas celestes.)







RODRIGO IBATA

Invasores espaciales

Reconocer a una inmigrante estelar requiere buena vista. En principio, se hacen notar por su alineación en largas corrientes, una suerte de conga en una multitudinaria sala de baile. Muchas de esas corrientes trazan caminos de estrellas desde un cúmulo globular o una de las galaxias satélite de la Vía Láctea. Tal punto de partida, o lo que queda de él, sería el presumible hogar original de las estrellas de la corriente. En la práctica, sin embargo, cuesta encontrar tales corrientes: apenas destacan con respecto a las homogéneas poblaciones estelares nativas. Muchos de los descubrimientos recientes solventaron este problema con técnicas de filtrado creadas en la Segunda Guerra Mundial para tomar imágenes más nítidas de los aviones. La técnica filtra las estrellas nativas, dada una idea aproximada de los patrones que ellas y las inmigrantes forman.

Posiblemente, la más impresionante de las corrientes estelares conocidas sea la de Sagitario, descubierta por uno de los autores (Ibata) y sus colaboradores en 1994, un inmenso collar de estrellas que rodea a nuestra galaxia. Abarca un millón de años-luz, contiene unos 100 millones de estrellas y conecta con la galaxia elíptica enana Sagitario, una de las entre 15 y 20 minigalaxias que orbitan alrededor de la Vía Láctea, a la manera en que los satélites giran alrededor de los planetas. El tamaño de las galaxias indicadas varía de una a otra: la mayor, la Gran Nube de Magallanes, tiene una décima parte de la masa de la Vía Láctea, la galaxia enana Sagitario una centésima parte, y las menores, una millonésima escasa.

No es acogedora la vida cerca de una galaxia gigante. Las galaxias pequeñas se deforman y, con el tiempo, se destruyen. Hace miles de millones de años que Sagitario agoniza; ahora, en las últimas etapas de su disolución, apenas parece un objeto definido. Sus estrellas se dispersarán por nuestra galaxia; su actual conformación de corriente se perderá y a los astrónomos del futuro les costará mucho distinguir sus estrellas de las nativas de la Vía Láctea. Otras galaxias pequeñas experimentan proce-

Resumen/*Corrientes de estrellas*

- La Vía Láctea se ha ensamblado a partir de cientos de galaxias menores, y el proceso continúa. Siempre que una galaxia pequeña o un cúmulo estelar se le acerca demasiado, la gravedad de nuestra galaxia los rompe, arranca sus estrellas, las extiende en largas corrientes y termina por absorberlas.
- Ni siquiera las corrientes de reciente formación se distinguen bien contra el fondo del resto de la galaxia; además, a medida que una corriente se dispersa, se desvanece su estructura espacial. No obstante, ciertos rasgos sutiles del movimiento y la composición estelares revelarán su origen. Con un censo minucioso de las estrellas, se podrá identificar a los inmigrantes galácticos y se sabrá cómo creció la Vía Láctea hasta su tamaño actual.
- Las corrientes proporcionan un nuevo modo de medir la materia oscura que envuelve a nuestra galaxia. La morfología de las corrientes es sensible a la cantidad y distribución de ese material invisible.

sos de desmembramiento; de algunas, sólo queda la corriente. Las hay que no pierden estrellas, sino gas; es el caso de la Gran Nube de Magallanes [*véase* “Procesos de formación en la Vía Láctea actual”, por Bart P. Wakker y Philipp Richter; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 2004].

El método de demolición nos resulta muy conocido: las mareas gravitatorias, el mismo proceso que causa el flujo y reflujo de los océanos en la Tierra. Las fuerzas de marea aparecen cuando las diferentes partes de un cuerpo experimentan atracciones gravitatorias distintas. La Luna ejerce una fuerza mayor en la cara terrestre que tiene más cerca y menor en la opuesta; la diferencia no da para romper nuestro planeta, pero sí para que el agua del mar suba y baje suavemente. Los movimientos de los dos cuerpos hacen que las mareas recorran el globo y el nivel del mar ascienda y descienda en ciclos regulares.

De manera similar, la Vía Láctea deforma una galaxia satélite o un cúmulo estelar cuando atrae con más fuerza uno de sus lados. Llega hasta a arrancarles estrellas. El satélite perderá más y más estrellas, que dibujarán un rastro desde su lugar de origen.

Teorías en construcción

La enana Sagitario, y los demás satélites galácticos, contribuyen a edificar nuestra propia galaxia. Estos hallazgos de la observación han revolucionado nuestras teorías de la formación de galaxias. Se pensaba que las galaxias, engendradas en adensamientos apenas perceptibles de un universo primordial bastante homogéneo, experimentaron en una época temprana un crecimiento rápido que les dio su forma presente. Hoy, debido en parte a las observaciones de las corrientes de estrellas, se cree que sólo las galaxias enanas (con masas de hasta mil millones de soles) pasaron por ese período abrupto de formación. Las grandes galaxias, como la Vía Láctea, con su billón de soles, se crearon después, mediante la acreción o coalescencia progresiva de enanas, proceso que continúa hoy día, aunque a un ritmo más lento que en el pasado.

Habiendo observado la absorción por la Vía Láctea de galaxias vecinas, la astronomía plantea cuestiones de otro nivel: ¿Cuál es el contenido químico de esas galaxias? ¿Cuál es la razón de estrellas inmigrantes a estrellas autóctonas en las galaxias gigantes de hoy? ¿Cómo alteraron la historia primitiva de la Vía Láctea los elementos químicos que las galaxias absorbidas inyectaron? Además de su interés inmediato por ser fósiles de los procesos de ensamblaje galáctico, las corrientes de estrellas resultan útiles a la hora de trazar la distribución de la materia oscura.

Para llegar a las respuestas, hay que empezar por conocer qué estrellas atraviesan un proceso actual de migración hacia la galaxia y cuáles migraron en el pasado. Pero una vez que las estrellas inmigrantes y el gas se mezclan con la Vía Láctea, dejan de aparecer como elementos espaciales reconocibles. Se deben buscar trazas más sutiles de los orígenes de tales estrellas: su movimiento y composición química, difíciles de borrar.

Tendemos siempre a caracterizar el movimiento de los cuerpos por su posición y velocidad. Pero el movimiento también tiene otras propiedades: la energía y el momento angular.

ASI SE DESMORONA UNA GALAXIA

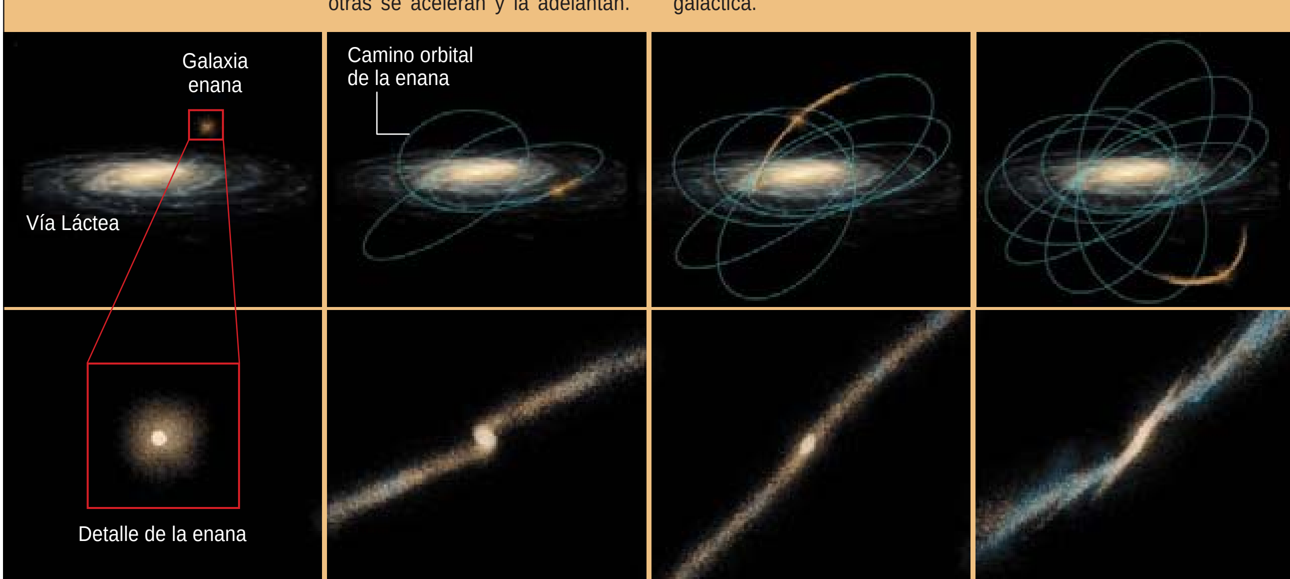
Una simulación por ordenador muestra que las fuerzas de marea ejercidas por la Vía Láctea distorsionan y, con el tiempo, desmenuzan una galaxia enana.

▼ HACE 3 MIL MILLONES DE AÑOS. Tras crecer en relativo aislamiento, la galaxia enana se aproxima por primera vez a la Vía Láctea.

▼ HACE 2 MIL MILLONES DE AÑOS. Tras cuatro aproximaciones al disco de nuestra galaxia, la galaxia enana se ha alargado. Unas estrellas se frenan y rezagan con respecto a la enana, otras se aceleran y la adelantan.

▼ HACE MIL MILLONES DE AÑOS. La enana corre peligro. Casi todas sus estrellas forman ahora una corriente de decenas de miles de años-luz a lo largo de la órbita galáctica.

▼ HOY DIA. La enana se ha roto por completo. La corriente de marea se ha ido disolviendo y sus estrellas se mezclan con las estrellas naturales de la Vía Láctea.



DON DIXON

VIENDO LO QUE NO PUEDE SER VISTO

Para reconstruir la historia de la Vía Láctea, hay que partir de lo que se ve: las estrellas. Ahora bien, las estrellas representan una fracción pequeña de las galaxias, que en su mayor parte se componen de materia oscura, cuya naturaleza se desconoce. Lo que sabemos de ella —que no es mucho— proviene de sus efectos gravitatorios en las estrellas y gas, que sí vemos. Mas rastrear lo que no se ve es dificilísimo.

El mayor anhelo de los observadores sería seguir el movimiento de una estrella a medida que describe una órbita alrededor del centro de la galaxia. La estrella se frenará o acelerará dependiendo del campo gravitatorio; reflejará así el modo en que la masa se distribuye por nuestra galaxia. Por desgracia, las carreras científicas de los astrónomos son demasiado cortas para llevar a cabo observaciones de esa clase, ya que una estrella necesita cientos de millones de años para recorrer una órbita completa.

Con las corrientes estelares se puede superar este contratiempo. Las estrellas de una corriente siguen órbitas similares; la única diferencia es que cada una comenzó su andadura en un momento diferente. Por tanto, la corriente traza el camino que una estrella seguirá durante cientos de millones de años. Nuestro equipo ha medido la estructura de la corriente de Sagitario, para llegar a la conclusión de que la materia oscura no se reparte alrededor de la Vía Láctea en un elipsoide, como predecían las simulaciones numéricas, sino en una esfera. Aún más interesante es el hallazgo de que el comportamiento de la corriente se ajusta a ciertas predicciones de teorías gravitatorias no ordinarias, como la dinámica newtoniana modificada (MOND).

Este resultado ha sido corroborado recientemente por Michael Fellhauer, de la Universidad de Cambridge, y sus colaboradores. Hay que hacer la salvedad de que con la corriente de Sagitario sólo se examina una pequeña parte de la distribución de la materia oscura. Se deben medir muchas corrientes estelares para determinar si realmente la distribución es esférica.

Falta por dirimir si la materia oscura se reparte homogénea o si crea grumos; según sea su naturaleza, cabría esperar lo uno o lo otro. Si la materia oscura está formada por partículas que interactúan sólo mediante fuerzas gravitatorias, no hay nada que impida su agrupamiento. Pero si se compone de partículas que interactúan también de otras maneras (si se hallan sujetas a la acción de las fuerzas nucleares, por ejemplo), podría resistirse a la atracción gravitatoria y extenderse homogéneamente. Las corrientes de estrellas constituyen una de las escasas posibilidades de estudiar los agrupamientos gravitatorios. Al explorar en detalle las posiciones y velocidades de las estrellas en las corrientes delgadas, el satélite Gaia deberá confirmar o descartar la existencia de grumos de materia oscura con diámetros de apenas 100 años-luz. De esta manera, corrientes estelares más extensas que una galaxia entera pondrían de manifiesto las propiedades de partículas más pequeñas que los átomos.



Así como la posición se especifica en un espacio tridimensional, la posición más el momento se definen en un espacio abstracto de seis dimensiones, el “espacio de fases”. La ventaja del espacio de fases es que la disposición de las estrellas en él aguanta más que en el real. Aunque el proceso de asimilación destruya la coherencia espacial de la corriente, no eliminará su coherencia en el espacio de fases; la razón es un principio clave de la mecánica estadística, el teorema de Liouville.

Por tanto, al medir la energía, el momento angular y la densidad en el espacio de fases de muestras aleatorias de estrellas se reconocerán agrupamientos estelares que no se perciben directamente, “fantasmas” de galaxias satélite hace tiempo disueltas. Varios grupos —entre ellos los dirigidos por Amina Helmi, del Instituto Astronómico Kapteyn en Groningen, y por Chris B. Brook, de la Universidad de Washington— han empleado este método para identificar los fósiles de la acreción de satélites. Todos se localizan en la vecindad del sistema solar, ya que los instrumentos no tienen todavía la precisión suficiente para medir el movimiento tridimensional de estrellas más alejadas.

¿Cuáles no son como las otras?

Otro método muy interesante que se empieza ahora a probar es el de la huella química. La mayoría de las estrellas no nacen aisladas, sino en grupos de miles o decenas de miles, creadas en una misma nube de gas. Cada nube tiene una mezcla única y homogénea de elementos químicos e isótopos. Su progenie estelar la hereda. Incluso cuando las estrellas se dispersan conservan esa etiqueta química, y gracias a ella cabe identificar su lugar de nacimiento. Kim A. Venn, de la Universidad de Victoria en la Columbia Británica, y sus colaboradores han demostrado que las estrellas formadas en las galaxias enanas tienen una composición química que no coincide con la de las estrellas originarias de la Vía Láctea.

La duda es si será posible encontrar la cuna de las estrellas tomadas de una en una. Gayandhi De Silva, del Observatorio Europeo del Sur, y su equipo han realizado un pormenorizado estudio químico de las Híades, uno de los cúmulos estelares mejor

conocidos de la Vía Láctea. Encontraron que las estrellas del cúmulo presentan una distribución de elementos químicos básicamente igual. Da a entender que la huella química servirá para identificar las estrellas que compartan un mismo origen. Algún día se podría hallar así a las hermanas del Sol, las estrellas que se formaron en la misma nube de gas que él, hoy dispersas por la galaxia.

Tras la verificación de la viabilidad de la huella química, se está poniendo en práctica la idea. Los proyectos RAVE (Experimento de Velocidad Radial), del Observatorio Angloaustraliano, y SEGUE (Extensión Sloan para la Exploración y Conocimiento de la Galaxia), en el telescopio Sloan, han medido la velocidad y la composición química de más de 100.000 estrellas cercanas. Se trata de los precursores de la misión Gaia, de la Agencia Espacial Europea, y de Interferometría Espacial (SIM), de la NASA.

Desde finales de 2011 hasta 2020, Gaia, el telescopio espacial más ambicioso técnicamente que se haya concebido, rastreará la estructura tridimensional de nuestra galaxia con medidas precisas de la posición y velocidad de mil millones de estrellas, casi el 1 % de la galaxia. También se prevé que ese satélite determinará las composiciones químicas de varios millones de esas estrellas. En un lapso de tiempo equiparable, SIM deberá informar de las posiciones de una submuestra de estrellas débiles, con lo que se tendrán datos de las corrientes estelares más tenues. Entre estas dos misiones se tiene lo mejor de dos mundos: una exploración sensible pero poco extensa (SIM) y otra muy amplia pero menos sensible (Gaia).

Hace diez años, cuando descubrimos la corriente estelar de la galaxia enana Sagitario, muchos lo consideraron una mera curiosidad, sin mayor relevancia. Pero pronto se convirtió en el emblema de una historia compleja de fusiones y acreciones de la Vía Láctea, procesos de los que hoy sabemos que son los motores de la formación y evolución galácticas. Las galaxias absorbidas aportaron nuevas estrellas, gas y materia oscura. Desencadenaron oleadas de creación de estrellas. Gracias a los inmigrantes, la Vía Láctea ha seguido siendo un lugar vibrante.

Campo de corrientes

Se han descubierto algo menos de una docena de corrientes de estrellas. Si las teorías actuales de la formación de las galaxias son correctas, la Vía Láctea habrá devorado cientos de sistemas estelares menores; la mayoría ya se habrán dispersado por la Vía Láctea y no se podrá dar con ellos.

Corriente	Origen probable	Masa aproximada	Longitud aproximada	Composición	Año de descubrimiento
Corriente de Arturo	Galaxia enana desaparecida	Desconocida	Desconocida	Estrellas viejas (pobres en elementos pesados)	1971
Corriente de Magallanes	Gran Nube y Pequeña Nube de Magallanes	200 millones de masas solares	1 millón de años-luz	Hidrógeno gaseoso	1972
Corriente de Sagitario	Galaxia enana Sagitario	100 millones de masas solares	1 millón de años-luz	Amplia variedad de estrellas	1994
Corriente de Helmi	Galaxia enana desaparecida	Entre 10 y 100 millones de masas solares	Varias vueltas alrededor del disco de la Vía Láctea	Estrellas viejas	1999
Corriente de Palomar 5	Cúmulo globular Palomar 5	5000 masas solares	30.000 años-luz	Estrellas viejas	2001
Anillo de Monoceros	Galaxia enana Canis Major	100 millones de masas solares	200.000 años-luz	Estrellas de edad intermedia	2002
Corriente del Anticentro	Galaxia enana desaparecida	Desconocida	30.000 años-luz	Estrellas viejas	2006
Corriente de NGC 5466	Cúmulo globular NGC 5466	10.000 masas solares	60.000 años-luz	Estrellas muy viejas	2006
Corriente Huérfana	Galaxia enana Ursa Major II	100.000 masas solares	20.000 años-luz	Estrellas viejas	2006

Los autores

Rodrigo Ibata y **Brad Gibson** trabajan juntos desde 1997. Ibata, del Centro Nacional Francés de Investigaciones Científicas, en el Observatorio de Estrasburgo, dirigió el equipo que descubrió las galaxias satélite enanas Sagitario, en 1994, y Canis Major, en 2004. Gibson es el coordinador de Astrofísica Teórica de la Universidad Central de Lancashire. Pionero de las simulaciones por ordenador de la formación de galaxias, ha estudiado las nubes de velocidad anómala que rodean la Vía Láctea.

Bibliografía complementaria

UNCOVERING COLD DARK MATTER HALO SUBSTRUCTURE WITH TIDAL STREAMS. R. A. Ibata, G. F. Lewis, M. J. Irwin y T. Quinn en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 332, n.º 4, págs. 915-920; junio, 2002.

GALACTIC CHEMICAL EVOLUTION. Brad K. Gibson, Yeshe Fenner, Agostino Renda, Daisuke Kawata y Hyun-chul Lee en *Publications of the Astronomical Society of Australia*, vol. 20, n.º 4, págs. 401-415; 2003.

TAKING MEASURE OF THE ANDROMEDA HALO: A KINEMATIC ANALYSIS OF THE GIANT STREAM SURROUNDING M31. R. Ibata, S. Chapman, A. M. N. Ferguson, M. Irwin, G. Lewis y A. McConnachie en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 351, n.º 1, págs. 117-124; junio, 2004.

GENETICA DEL ALCOHOLISMO

JOHN I. NURNBERGER, JR. Y LAURA JEAN BIERUT

La identificación de las bases genéticas de la sensibilidad al alcoholismo encauza los tratamientos y ayuda a quienes están expuestos a la adicción

Se sabe desde hace tiempo que la tendencia al alcoholismo viene de familia. Para algunos, ello no hace más que abonar el estigma social que conlleva un estado desgraciado. Para los expertos, en cambio, el carácter en apariencia hereditario de la sensibilidad a los problemas con el alcohol sugirió la existencia de un componente hereditario que se transmitía de una generación a otra.

Merced a los rápidos avances del último decenio en el descubrimiento y análisis de las funciones génicas, podemos ahondar en las raíces biológicas de trastornos complejos, tales como el abuso y la adicción de ciertas sustancias. Ya es posible examinar patrones de herencia en poblaciones extensas y analizar cientos de miles de minúsculas variaciones en el genoma de cada sujeto afectado. Con ello se dispone de medios para localizar genes específicos que influyan con mayor o menor fuerza sobre la fisiología de una persona y que conlleven el riesgo de una enfermedad.

Como sucede en numerosas patologías, la causa del alcoholismo no es única, ni su origen enteramente genético. Con todo, los genes desempeñan una función de suma importancia, pues afectan a procesos somáticos y psíquicos que interactúan entre sí y con las experiencias vitales de un individuo, para protegerle o hacerle más sensible. Deslindar esos efectos constituye todo un reto. Hasta ahora apenas se ha identificado una docena de genes que afecten al riesgo de alcoholismo, pero habrá más sin duda.

Las variantes de cada uno de los genes conocidos sólo alteran ligeramente la vulnerabilidad del individuo al alcohol. Sin embargo, abundan las variantes comunes para la mayoría, por lo que pueden ejercer efectos más señalados en los hábitos de bebida, otras adicciones o

IAN MCKINNELL *Photonica/Getty Images (hombre con vaso)*; BRIAN BERMAN *Taxi/Getty Images (cara del niño)*; EMILY HARRISON *(fotoilustración)*



comportamientos irregulares; también en la depresión, la ansiedad y otros trastornos de pareja índole. El hallazgo de los genes involucrados en nuestras respuestas al alcohol y la comprensión de sus efectos quizá sirvan, además, para descubrir un cuadro más extenso de enfermedades. Sin duda alguna, sacar a la luz los procesos biológicos responsables de la aparición del alcoholismo y de su potenciación, facilitará la mejora de los tratamientos existentes y la concepción de otros nuevos que liberen de esa dependencia.

Variantes génicas

Los genes influyen poderosamente en la fisiología humana. Dan origen a unos 100.000 tipos de proteínas, cada una con intervención directa en el funcionamiento diario del organismo o en la regulación de la actividad de otros genes. La estrecha relación entre las variaciones de la fisiología básica y la sensibilidad al alcoholismo queda ilustrada por el primer gen que se descubrió implicado en el riesgo de dependencia del alcohol.

Hace varios decenios comenzó a investigarse la tendencia de individuos originarios del Extremo Oriente a "enrojecer" cuando tomaban alguna bebida alcohólica. El análisis de sangre reveló un aumento del nivel de acetaldehído, un producto de descomposición del alcohol que genera una incómoda sensación de quemazón en la piel, palpitaciones y debilidad. En los años ochenta, se descubrió que la reacción se debía a una enzima que interviene en el metabolismo del alcohol, la aldehído deshidrogenasa, y, en último término, al gen que la codifica, *ALDH1*. La enzima descompone el acetaldehído, pero las variantes del gen de esos individuos hacían que la enzima actuara con mayor lentitud. Cuando ingerían alcohol, sintetizaban acetaldehído, tóxico en dosis elevadas.

Se ha encontrado que esta variante de *ALDH1* es común en las poblaciones asiáticas. Son portadores un 44 por ciento de japoneses, un 53 por ciento de vietnamitas, un 27 por ciento de coreanos y un 30 por ciento de chinos, con un 45 por ciento de chinos Han. En cambio, es rara en personas de ascendencia europea. De acuerdo con lo esperado, los individuos con la variante de metabolismo lento corren un riesgo de alcoholismo hasta seis veces menor. Se trata, por tanto, de una mutación que protege contra el trastorno.

Se ha estudiado también la contribución genética al alcoholismo de otras enzimas que descomponen el alcohol. Así, la alcohol deshidrogenasa (ADH), que controla la primera etapa de la conversión del alcohol en acetaldehído; viene codificada dicha enzima por una familia de genes, cada uno de los cuales afecta a propiedades distintas de la misma. Los genes que revisten mayor importancia para el metabolismo del alcohol son el *ADH4* y el grupo *ADH1*. Nuestros análisis sobre la población estadounidense de ascendencia europea han encontrado pruebas inequívocas de que las variaciones en *ADH4* potencian el riesgo de alcoholismo en los miembros de esa población. Queda por descubrir la repercusión exacta de cada variante en el metabolismo del alcohol.

La genética del alcoholismo es compleja. Intervienen múltiples genes. Y se necesita examinar su interacción mutua y con el entorno para componer una imagen completa de los procesos que conducen a la adicción. También las personas son complejas y manifiestan de modos diversos los efectos del alcohol, sobre todo en las primeras fases del trastorno; en las últimas fases, los casos convergen hacia un cuadro clínico común. Por eso, la investigación de la biología del alcoholismo exige una definición cuidadosa del problema. De entrada, distinguir entre dependencia y abuso del alcohol, un síndrome de menor gravedad.

El diagnóstico de la dependencia, sea del alcohol o de otras sustancias, suele realizarse a partir de un patrón psiquiátrico. La persona debe haber sufrido, en los últimos 12 meses, al menos tres de los síntomas siguientes: tolerancia a dosis elevadas, síndrome de abstinencia, pérdida de control sobre el consumo de la sustancia, voluntad de detener o cortar la adicción, largo tiempo invertido en la actividad, abandono de otras actividades y uso continuado pese a los problemas físicos o psicológicos resultantes. Es frecuente que quienes cumplen esos requisitos cuenten con varios casos de alcoholismo en su familia. Con la participación voluntaria de esos sujetos, hemos empezado a relacionar los síntomas individuales con las causas fisiológicas y, en último término, con los genes responsables.

Endofenotipos

En la búsqueda de genes que afecten al riesgo de dependencia alcohólica reviste interés primario el examen de los endofenotipos. La investigación sobre esos rasgos físicos (fenotipos) no externamente visibles, aunque sí mensurables, determina la existencia de patrones más comunes en gente afectada por una patología compleja y el vínculo de los mismos con el riesgo de sufrir tal enfermedad.

Se parte de un supuesto básico: los endofenotipos revelan mejor que los síntomas conductuales las bases biológicas de un trastorno, por la sencilla razón de que representan un rasgo físico fundamental más íntimamente ligado a su origen en una variante génica. Ese enfoque del estudio de los comportamientos complejos arranca de los años setenta, en el marco de la investigación sobre la esquizofrenia. Pero su valor se ha realzado con los

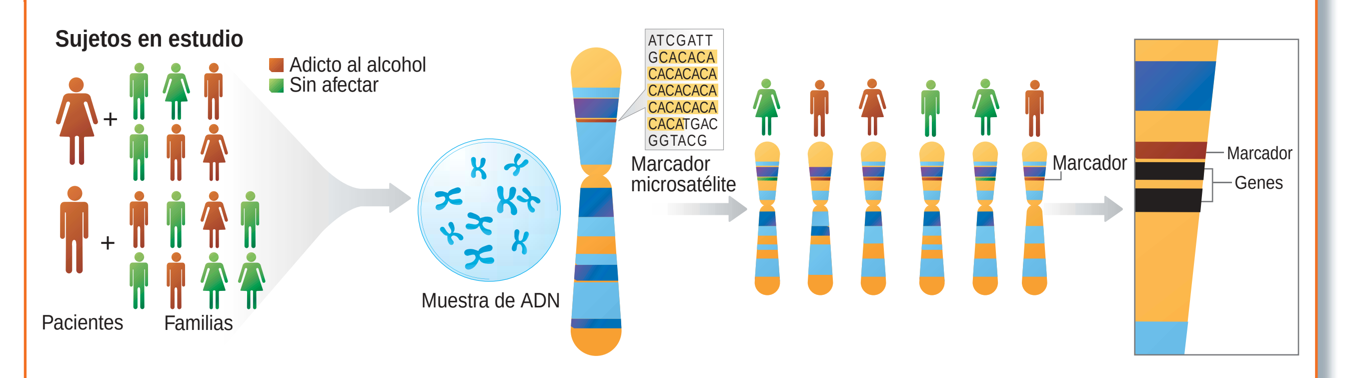
Resumen/*Genes del alcoholismo*

- El alcoholismo constituye un trastorno complejo y controvertido. La sensibilidad al mismo muestra patrones hereditarios, lo que sugiere una base genética de la enfermedad.
- Mediante el estudio de los patrones de actividad cerebral, genuinos de los alcohólicos y su progenie, se identifican las variantes génicas que inciden en la respuesta al alcohol.
- La investigación exitosa sobre los mecanismos genéticos del alcoholismo y otros trastornos afines arroja luz sobre el desarrollo de tales enfermedades, abre el camino para la mejora de los tratamientos y facilita a las personas con alto riesgo la toma de decisiones informadas sobre su propia salud y conducta.



VINCULOS GENETICOS

La identificación de los genes del alcoholismo comienza con la asociación de sus rasgos distintivos a determinadas regiones cromosómicas. Este “análisis de vínculos” es directo en los grupos emparentados: familias con miembros alcohólicos en mayor o menor grado. Los marcadores cromosómicos, presentes con mayor frecuencia en los parientes afectados, señalan segmentos de ADN de posible interés. La investigación de esas regiones revela un gen que participa en las respuestas al alcohol.



ENROLAMIENTO
Se entrevistan alcohólicos que hayan solicitado tratamiento y familiares suyos, dispuestos colaborar; se les diagnostica el grado de alcoholismo según criterios psiquiátricos aplicables a la adicción. Todos ellos proporcionan muestras de ADN.

ESTUDIO CROMOSOMICO
Se analizan los cromosomas de cada persona para descubrir patrones de repetición de ADN (marcadores microsatélite). En un individuo, la secuencia alternada de las bases citosina y adenina podría repetirse 17 veces, por ejemplo, mientras que en la misma posición otro familiar mostraría sólo 12 repeticiones de tal secuencia.

ANALISIS DE VINCULOS
Los marcadores que suelen hallarse en personas con un rasgo específico del trastorno, aunque con menor frecuencia en los parientes no afectados, señalan una región cromosómica relacionada con ese rasgo.

ASOCIACION DE GENES
Una cartografía más detallada de la región del ADN próxima a un marcador revela genes específicos cuya función en el trastorno podría investigarse.

LUCY READING-IKKANDA

medios modernos de evaluación de procesos biológicos y análisis de datos genéticos.

Los patrones de actividad eléctrica cerebral constituyen una forma de endofenotipo. La electroencefalografía (EEG), que detecta esa actividad mediante la aplicación de electrodos al cuero cabelludo, registra los patrones de excitación neuronal. Los datos se analizan con refinados algoritmos para acotar en qué regiones del cerebro se han originado las señales. De ese modo se recaban nuevas pistas sobre el tipo de proceso cognitivo en curso.

En los electroencefalogramas aparecen ondas cerebrales y picos de actividad neuronal en respuesta a estímulos específicos. Puesto que esos patrones varían de un individuo a otro, constituyen una suerte de huella digital neurológica. Asimismo, reflejan el equilibrio general entre los procesos excitadores en el interior del cerebro, que agudizan la respuesta de las neuronas a las señales enviadas por otras, así como los procesos inhibidores que atenúan tales respuestas.

Los patrones electrofisiológicos presentan un componente hereditario notable. De los ofrecidos por alcohólicos difieren los patrones de los sobrios. En los cerebros de sujetos alcohólicos predomina la excitación sobre la inhibición. Ese desequilibrio, o “desinhibición”, aparece también en los hijos de alcohólicos; permite prever una conducta alcohólica el día de mañana. Con otras palabras, los patrones nos revelarían una predisposición hereditaria al alcoholismo.

Añádase que tales “rúbricas” identificadoras pueden apuntar a la propia sensibilidad heredable. Se cree que la desinhibición responde a una carencia general de neuronas inhibidoras funcionales en las áreas del cerebro responsables de la emisión de juicios y la toma de decisiones; las personas con semejante carencia serían quizá más propensas a actuar por impulsos originados en las regiones inferiores del cerebro, como la amígdala.

En los años ochenta, varios laboratorios demostraron que la actividad eléctrica cerebral revelaba el riesgo de dependencia alcohólica. Ello animó a pensar que resultaba, a la vez, factible y provechoso emprender la búsqueda de los genes subyacentes bajo los fenotipos asociados al alcoholismo. Con el apoyo del estadounidense Instituto Nacional de Abuso del Alcohol y Alcoholismo, se acometió en 1989 un estudio sobre la genética del alcoholismo, el COGA (de “Collaborative Study on Genetics of Alcoholism”), en el que participamos los autores del artículo. Hoy trabajan en el proyecto ocho centros de investigación y miles de alcohólicos y familiares.

Lazos familiares

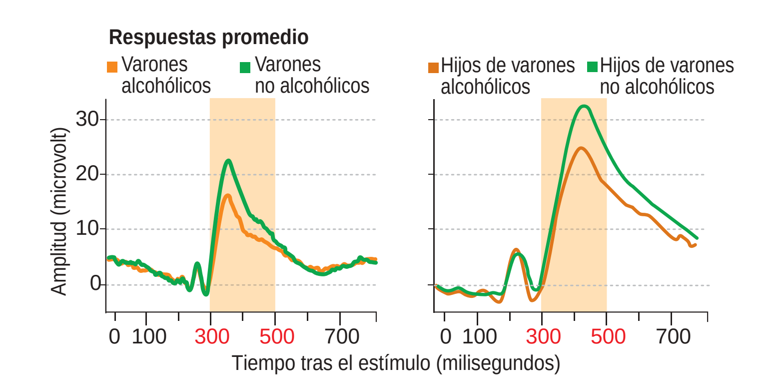
En los comienzos del COGA, se buscaron por todo el país familias gravemente afectadas de alcoholismo. Los

HUELLAS CEREBRALES

Ciertos patrones de la actividad eléctrica cerebral constituyen rasgos mensurables (endofenotipos) que revelan características fisiológicas distintivas de los alcohólicos y otros sujetos con riesgo elevado de adicción. Esas huellas cerebrales se han utilizado para descubrir genes vinculados al alcoholismo y trastornos afines.

La respuesta P300

La medición de la actividad cerebral por electrodos aplicados al cráneo revela que entre 300 y 500 milisegundos después de un estímulo (un destello de luz, por ejemplo) aparece un pico de intensidad (amplitud) de la señal. Esa respuesta distintiva, la P300, es más débil en los alcohólicos, incluso cuando no beben, que en los no alcohólicos. En los hijos de padres alcohólicos es usual una P300 mutada. Ello indica que esa diferencia de función cerebral es precursora de afición a la bebida; constituye un factor de riesgo de alcoholismo.

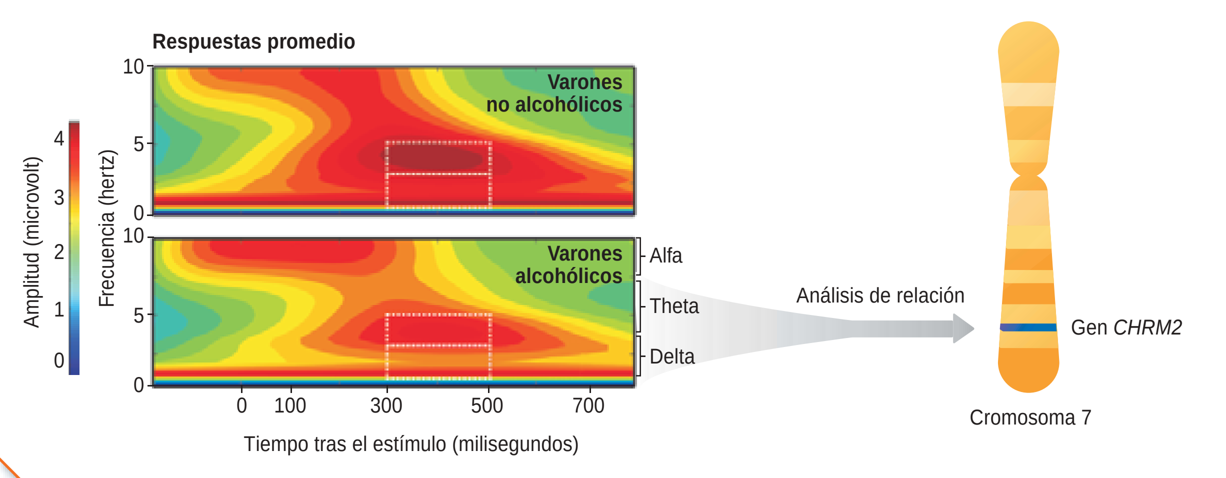


Disección de la respuesta

La P300 comprende señales neuronales en las bandas de baja frecuencia delta y theta, que están asociadas con la consciencia y la toma de decisiones. La cartografía en esas bandas de los EEG de sujetos no alcohólicos (*debajo*) y alcohólicos (*más abajo*) revela señales más débiles en los alcohólicos al cabo de 300 milisegundos. En los estudios por familias, este rasgo aparecía vinculado al alcoholismo y la depresión.

Relación con un gen

Se ha relacionado la intensidad reducida de las señales de frecuencias delta y theta en los alcohólicos con variantes de *CHRM2*. Ese gen codifica un receptor celular para el neurotransmisor acetilcolina, regulador de la excitabilidad neural.



estudios anteriores sobre familias, hermanos gemelos e hijos adoptados indicaban una fuerte tendencia a heredar la adicción al alcohol. De hecho, cabe atribuir a factores heredados más del 50 por ciento del riesgo de alcoholismo. Por eso, los grupos familiares constituyen un valioso recurso para el rastreo de rasgos específicos y su vinculación con los genes correspondientes.

Se entrevistaron alrededor de 1200 sujetos alcohólicos que solicitaban tratamiento para su dependencia; la entrevista se extendía a sus familiares: más de 11.000 personas en total. Había 262 familias "gravemente afectadas", lo que significaba que al menos dos parientes en primer grado del paciente (progenitores o hermanos) eran dependientes. Se evaluaron los endofenotipos electrofisiológicos cerebrales de los miembros de esas familias, estuvieran o no afectados. Los sujetos se sometieron luego a nuevas entrevistas para evaluar las características adicionales asociadas al riesgo de alcoholismo e influidas por la genética. En esos rasgos se incluyen la "respuesta baja" (cuando el afectado debe consumir cantidades de alcohol por encima de la media para sentir sus efectos), experiencias anteriores de depresión mayor y datos históricos (verbigracia, número máximo de vasos bebidos en 24 horas).

Se extrajeron de los voluntarios muestras de ADN. Se examinaron los cromosomas de cada individuo; se determinaron las características moleculares que servían de marcadores para una región cromosómica de interés. Los marcadores que aparecían con mayor frecuencia en los parientes con fenotipos asociados al alcoholismo sugerían una relación causal entre la región cromosómica y el rasgo fenotípico.

Se identificaron así vínculos en los cromosomas 1, 2, 4 y 7. Tras largos años de cartografía genética, se

acotaron varios genes específicos en esas regiones: *ADH4* y *GABRA2* en el cromosoma 4, y *CHRM2* en el cromosoma 7. Otros grupos que investigan poblaciones separadas hablan de asociaciones entre un riesgo de alcoholismo y esas regiones cromosómicas y genes, lo que confirma su probable intervención en el trastorno.

Las investigaciones en curso han revelado que algunas variantes génicas que codifican puntos de anclaje en la superficie celular para la proteína GABA (ácido gamma-aminobutírico), portadora de señales entre ciertas células nerviosas, aumentan la vulnerabilidad ante el alcoholismo. La GABA constituye el neurotransmisor inhibidor predominante en el sistema nervioso de los mamíferos. Modula la actividad de las neuronas mediante la unión a receptores específicos de GABA, sitos en la membrana celular, e inhibición de su capacidad de respuesta a las señales.

Cierta clase de esos receptores, los $GABA_A$, consta de subunidades proteicas dispuestas en torno de un canal que admite la entrada de iones cloruro en el interior de la célula. Se ha descubierto que las variaciones del gen *GABRA2*, que codifica una de las subunidades de $GABA_A$, influye de un modo poderoso en un endofenotipo del EEG, la frecuencia beta, que participa en la desinhibición neuronal, según se cree.

En la corteza frontal del cerebro, donde abundan las neuronas con receptores GABA, la pérdida general de inhibición provoca ataques de apoplejía. Tales trastornos suelen tratarse con una medicación que aumenta la actividad de GABA y promueve la inhibición. Se da por cierto que una pérdida de inhibición menos extensa e inducida por GABA se hallaría asociada a la conducta descontrolada o impulsiva que caracteriza al trastorno afectivo bipolar, al abuso de sustancias, a problemas de conducta crónicos y a otras enfermedades mentales.

Los estudios del COGA hallaron variantes del gen *GABRA2* vinculadas al alcoholismo, descubrimiento confirmado después por cuatro grupos al menos. Las mutaciones de *GABRA2* no modifican la estructura proteínica del receptor $GABA_A$; en cambio, sí parecen alterar la producción de la subunidad proteica afectada, tal vez reduciendo el número total de receptores funcionales.

Se investiga de qué modo la variante génica del receptor GABA repercute en la desinhibición del cerebro. Es plausible que exista una conexión entre la actividad de GABA y la dependencia del alcohol, ya que la impulsividad se da en numerosos casos de adicción alcohólica. Ese rasgo va asociado a un tipo de adicción que aparece de forma precoz, sobre todo en varones. Los individuos que la sufren tienden a presentar trastornos de “exteriorización” que implican conductas problemáticas; se contraponen a los trastornos de “interiorización” como la ansiedad y la depresión. Sin haber examinado siquiera la genética de ese paciente, la comprensión de la probable participación de GABA en tal perfil de adicción puede ofrecernos, en consecuencia, una estimable orientación terapéutica.

Acetilcolina

El estudio de los endofenotipos ha traído a primer plano otro neurotransmisor en el desarrollo del alcoholismo: la acetilcolina, que, como el GABA, afecta a neuronas distribuidas profusamente por el sistema nervioso central. Las neuronas que responden a la acetilcolina (neuronas colinérgicas) desempeñan una función esencial en la modulación del equilibrio global entre excitación e inhibición en el cerebro. Nuestras mediciones de la respuesta cerebral en los sujetos que participan en el COGA descubrieron una conexión con la región cromosómica que contiene el gen *CHRM2*; éste codifica un tipo particular de receptor colinérgico, el receptor de acetilcolina muscarínico M2 (CHRM2).

La activación del receptor CHRM2 altera la señalización neuronal en las frecuencias lentas delta y theta, que se asocian a la toma de decisiones, la atención y otras funciones cognitivas. También se han vinculado variantes del gen *CHRM2* con el cuadro clínico del alcoholismo y la depresión mayor. Como sucede con el *GABRA2*, las variantes de *CHRM2* que condicionan la actividad eléctrica cerebral, no parece que ni el alcoholismo ni la depresión alteren la estructura de la proteína receptora, sino su proceso de síntesis.

Dicha asociación reviste especial interés porque confirma parte de una hipótesis esbozada en 1976 por el grupo de David Janowsky, de la Universidad Vanderbilt: para funcionar con normalidad, el cerebro necesita mantener un delicado equilibrio entre los procesos que regulan la señalización. El equipo de Janowski propuso que la hipersensibilidad a la muscarina —efecto potenciado de la acetilcolina sobre los receptores colinérgicos muscarínicos—, en las personas propensas a la depresión y enfermedades afines, constituía una fuente de desequilibrio cerebral.

Los vínculos entre el *CHRM2*, el alcoholismo y la depresión descubiertos en fecha reciente son los primeros que revelan una conexión directa entre la hipersensibilidad denunciada y un gen determinado. Esos hallazgos relativos al sistema colinérgico señalan nuevos objetivos para el desarrollo de tratamientos farmacológicos del alcoholismo y la depresión. Subrayan, asimismo, la necesidad de comprender por qué unas diferencias fisiológicas tan sutiles desatan un trastorno tan complejo como la adicción.

Discernimiento, no destino

El proyecto COGA se ha estructurado en torno a las familias. Pero la investigación no deja de ilustrar el riesgo que ciertas variantes génicas comportan en grupos étnicos distintos. No se afirma que determinadas etnias sean más propensas al alcoholismo. Antes bien, indicamos que ciertas variantes de riesgo prevalecen más en unos grupos étnicos que en otros, a la manera en que la variante de *ALDH1* causa intolerancia al alcohol en numerosos asiáticos.

El conocimiento de que tales genes puedan influir en la dependencia del alcohol en pacientes que pertenecen a alguno de los grupos aludidos constituye otro instrumento de gran utilidad para la personalización del tratamiento.

Nuestro equipo descubrió en fecha reciente que la variabilidad de un gen que codifica un receptor involucrado en la percepción del sabor, el hTAS2R16, guardaba relación con el alcoholismo en los voluntarios del COGA. La forma variante, que rebaja la sensibilidad a numerosas sustancias de sabor amargo, es rara en los

norteamericanos de origen europeo, pero aparece en el 45 por ciento de los negros, lo que constituye un factor de riesgo mayor para esa población.

El grado de participación de la genética en la dependencia identificado hasta ahora incide en numerosos aspectos de la fisiología humana: desde el metabolismo del alcohol hasta la actividad cerebral y la percepción del sabor. El efecto individual de cada gen mencionado es moderado, pues aumenta el riesgo entre un 20 y un 40 por ciento. Sin duda hay otros genes, aún no identificados, que contribuyen a la vulnerabilidad ante el alcoholismo.

Para confirmar y depurar los hallazgos genéticos, debe comprobarse su influjo en edad precoz, incluso antes de que el sujeto empiece a beber con desmesura. Ha de averiguarse si las variantes génicas predicen el desarrollo ulterior del alcoholismo. Con este fin, el COGA ha incorporado una rama dedicada al seguimiento de los miembros jóvenes de familias de alto riesgo. Los resultados iniciales demuestran que, en los adolescentes, las variantes de riesgo del gen *ADH* se hallan asociadas a la precocidad en el beber y el consecuente desarrollo de trastornos alcohólicos.

Sin embargo, es más probable que los portadores de las variantes de riesgo de *CHRM2* presenten, en la adolescencia, síntomas precoces de depresión que problemas con la bebida. Los muchachos con la variante de riesgo *GABRA2* desarrollan conductas conflictivas (peleas callejeras, altercados con la policía, expulsión de la escuela) con mayor frecuencia que una iniciación temprana en el alcohol. Por otra parte, no hay duda de que las variantes de riesgo del gen receptor de GABA en los adultos jóvenes están vinculadas a la adicción.

Los hallazgos reseñados refuerzan la tesis de una adicción alcohólica de origen dispar; a la dependencia se llega por distintas vías fisiológicas. Las variantes de riesgo del *ADH* quizá contribuyan al desarrollo del alcoholismo mediante la incitación a beber en demasía, mientras que las variantes de *GABRA2* predisponen a alteraciones de la conducta, que constituyen en sí mismas un factor de riesgo para el alcoholismo. Sin olvidar que el *CHRM2* puede inducir a la bebida a través de la depresión y otros trastornos de "interiorización".

Tratamiento personalizado

Conforme se van desentrañando las relaciones entre genes y alcoholismo, avanza la evaluación del riesgo individual de caer en la adicción y se camina con mayor solidez hacia la identificación de los afectados que

GENES DE RIESGO

En el riesgo de alcoholismo influyen genes asociados a una gran variedad de procesos fisiológicos: la degradación del propio alcohol, el equilibrio de las funciones cerebrales, el gusto y el refuerzo de la recompensa. Las variaciones de los genes que controlan esos rasgos en unos casos protegen al individuo ante respuestas al alcohol que potencien la adicción; en otros casos, le predisponen a tales respuestas. Algunas de las mismas variantes génicas se han relacionado también con otros rasgos o trastornos, lo que sugiere solapamientos en el origen de ciertas alteraciones de la conducta, el humor y la dependencia.

GEN; POSICION	PROTEINA CODIFICADA; FUNCION	EFECTO DE LA VARIANTE GENICA	OTRAS CARACTERISTICAS O TRASTORNOS RELACIONADOS
ADH4; **cromosoma 4**	Alcohol deshidrogenasa; enzima que metaboliza el alcohol	Aumento del riesgo (ciertas variantes)	Ninguno
ALDH1; **cromosoma 4**	Aldehído deshidrogenasa; enzima que metaboliza el alcohol	Protector	Ninguno
CHRM2; **cromosoma 7**	Receptor de acetilcolina muscarínico M2; regula la señalización neuronal	Aumento del riesgo	Depresión profunda; variaciones de EEG en frecuencias delta y theta
****DRD2;*** **cromosoma 11**	Receptor de dopamina D2; regula el refuerzo de la señal de recompensa	Aumento del riesgo	Hábito de fumar
GABRG3; **cromosoma 15**	Subunidad g3 del receptor $GABA_A$; regula la señalización neuronal	Aumento del riesgo	Ninguno
GABRA2; **cromosoma 4**	Subunidad a2 del receptor $GABA_A$; regula la señalización neuronal	Aumento del riesgo	Drogodependencia; trastornos de conducta; variaciones de EEG en frecuencias delta y theta
HTAS2R16; **cromosoma 7**	Receptor de hTAS2R16; contribuye a la sensibilidad al sabor amargo	Aumento del riesgo	Ninguno
OPRK1; **cromosoma 8** ***PDYN;*** **cromosoma 20**	Receptor opioide Kappa y prodinorfina, péptido al que se une el receptor; ambos participan en la regulación de la aversión y la recompensa	Aumento del riesgo	Respuesta al estrés; puede intervenir en la habituación a la heroína y la cocaína

**Hasta la fecha, los hallazgos sobre DRD2 son contradictorios. La investigación debe proseguir para confirmar la función de ese gen en la dependencia del alcohol o la nicotina.*

puedan responder mejor a tratamientos determinados. Cuando un médico piensa en combinar fármacos y recomendaciones conductuales para el tratamiento de la hipertensión, el cáncer, el trastorno afectivo bipolar y otras patologías complejas, considera el perfil genético del paciente, junto con otros factores de riesgo familiares y ambientales. Los médicos están comenzando a utilizar las variantes génicas para afinar el tratamiento del alcoholismo; esperamos que en el futuro dispongan de directrices moleculares que apoyen el desarrollo de esas terapias individualizadas.

Asimismo, los descubrimientos genéticos recientes sobre el alcoholismo pueden mejorar la prevención y el tratamiento del tabaquismo y otras formas de dependencia, a menudo manifiestas en los alcohólicos y con tendencia a agruparse en una misma familia. Los trastornos del humor y la ansiedad caen también dentro de esa categoría. La asociación entre las variantes de *CHRM2*, el alcoholismo y la depresión sugiere un posible origen común para estas alteraciones, al menos en parte. Por tanto, una mejor comprensión de la dependencia del alcohol ayudará a discernir los factores implicados en el desarrollo de trastornos afines.

Pese a todo, la genética no predestina ineluctablemente. Los genes podrían interaccionar con determinados entornos tóxicos, como el abuso o la negligencia, lo que acarrea problemas para algunos portadores del gen, aunque no para otros. Además, si la mitad del riesgo de alcoholismo es heredable, la otra mitad procederá de otras fuentes. Nadie se convierte en alcohólico si no comete algunas torpezas; si bien, a igualdad de circunstancias, hay personas más vulnerables. Los expertos trabajan para identificar los orígenes de esa proclividad.

Las voces críticas sostienen que la investigación genética de la adicción alcohólica y otras, tabaquismo incluido, no es rentable desde una perspectiva de salud pública. Hay quienes reclaman que sería más razonable destinar los recursos a un recorte del consumo de sustancias potencialmente adictivas que identificar —y posiblemente estigmatizar— a los individuos más afectados por las restricciones acometidas.

Nadie cuestiona la necesidad de limitar el consumo de alcohol, nicotina y otras drogas perturbadoras. Pero no podemos dejar de apoyar el autoconocimiento de nuestras propias inclinaciones, de suerte que podamos tomar decisiones informadas.

Las pruebas genéticas ofrecen herramientas de autoevaluación antaño imposibles; la demanda de perfiles génicos crecerá en los próximos años. Se utilizan micromatrices (o chips de ADN) para detectar las variantes génicas de una persona y el rango de variabilidad de la función de los genes en cuestión. De esos resultados se extraen recomendaciones médicas, psiquiátricas y de conducta que el individuo puede tomar o dejar como le plazca.

El uso del conocimiento científico parece inevitable, sobre todo en países libres con economía de mercado. Por tanto, compete a la comunidad científica y académica orientar el proceso. Para ello deben distinguir las relaciones fisiológicas verdaderas de las que pretenden serlo y velar por la responsabilidad social en la aplicación que se dé a tales descubrimientos.



SCOTT GIBSON *Corbis*

Los autores

John I. Nurnberger, Jr. y **Laura Jean Bierut** colaboran en el estudio de las influencias genéticas sobre la adicción, la depresión y el trastorno bipolar. Nurnberger, profesor de psiquiatría en la Universidad de Indiana, dirige el Instituto de Investigación Psiquiátrica. Bierut imparte clases de psiquiatría en la Universidad de Washington en St. Louis. Ambos participan en un proyecto sobre la genética del alcoholismo (COGA). Los autores desean expresar público reconocimiento a la memoria de Henri Begleiter y Theodore Reich, por su inestimable legado en la creación y el desarrollo de COGA.

Bibliografía complementaria

THE COLLABORATIVE STUDY ON THE GENETICS OF ALCOHOLISM: AN UPDATE. Howard J. Edenberg en *Alcohol Research & Health*, vol. 26, n.º 3, págs. 214-218; 2002.

EVIDENCE OF COMMON AND SPECIFIC GENETIC EFFECTS: ASSOCIATION OF THE MUSCARINIC ACETYLCOLINE RECEPTOR M2 (CHRM2) GENE WITH ALCOHOL DEPENDENCE AND MAJOR DEPRESSIVE SYNDROME. Jen C. Wang et al. en *Human Molecular Genetics*, vol. 13, n.º 17, págs. 1903-1911; 30 de junio, 2004.

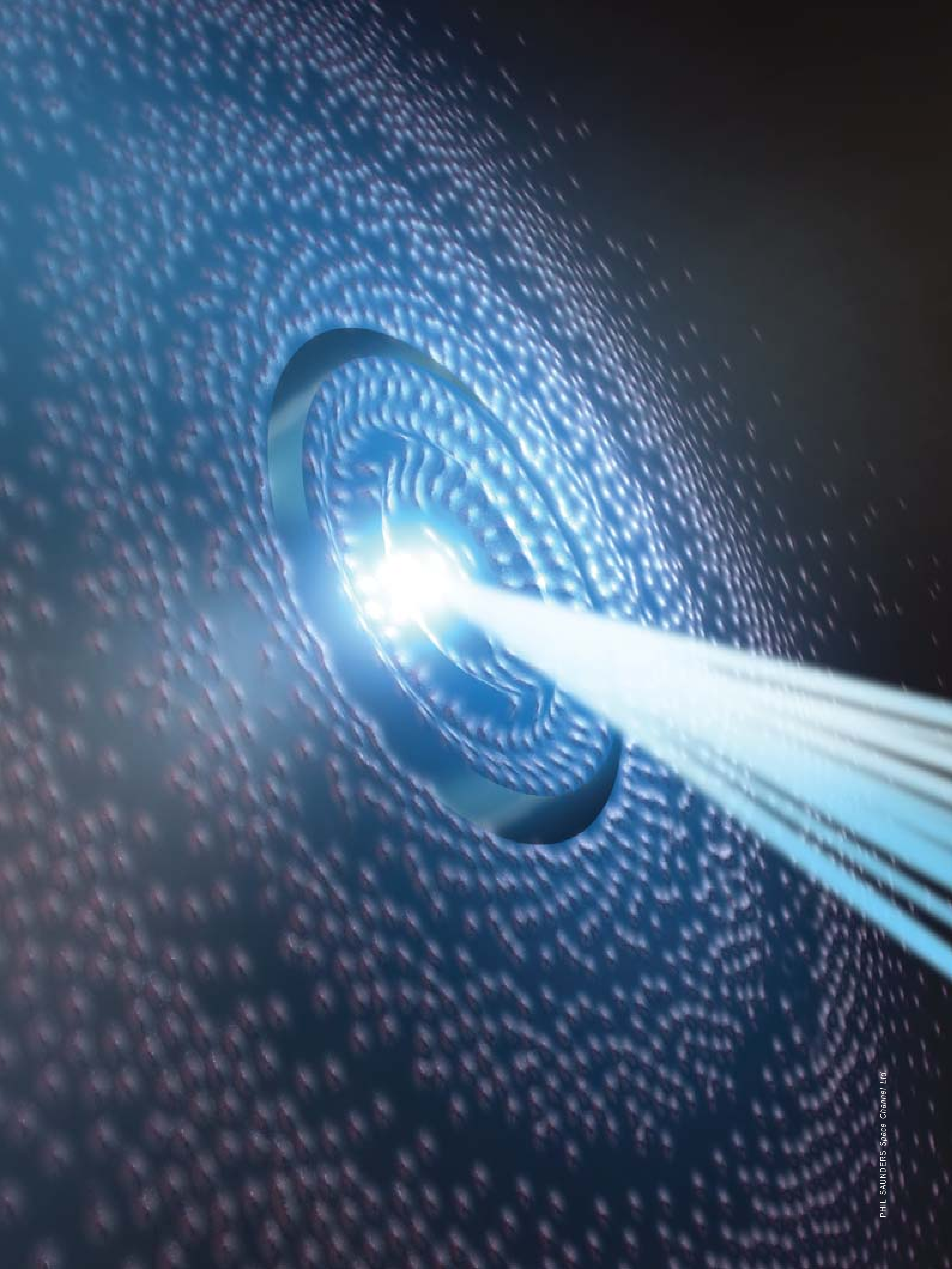
ENDOPHENOTYPES SUCCESSFULLY LEAD TO GENE IDENTIFICATION: RESULTS FROM THE COLLABORATIVE STUDY ON THE GENETICS OF ALCOHOLISM. Danielle M. Dick et al. en *Behavior Genetics*, vol 36, n.º 1, págs. 112-126; enero, 2006.

Al comprimir ondas electromagnéticas
en estructuras minúsculas,
la nueva técnica quizá propicie
chips ultrarrápidos y detectores moleculares
ultrasensibles

PLASMONICA

HARRY A. ATWATER

1. UN HAZ DE LUZ INCIDENTE sobre una superficie metálica puede generar plasmones, ondas de densidad electrónica dotadas de capacidad de portar ingentes cantidades de datos. Si el haz se enfoca sobre una superficie grabada con un surco circular, como en la ilustración, el haz produce ondas concéntricas y organiza los electrones en anillos, con crestas y valles de densidad electrónica.


PHIL SAUNDERS *Space Channel Ltd.*

La luz es un maravilloso medio de transporte de información. El mundo está hoy cubierto de fibras ópticas, que guían señales de luz portadoras de caudalosos flujos de comunicaciones de voz e ingentes volúmenes de datos. Esta colosal capacidad ha llevado a profetizar que los dispositivos fotónicos —a través de los cuales se canaliza y manipula la luz visible y otras ondas electromagnéticas— podrían llegar algún día a reemplazar a los circuitos electrónicos de los microprocesadores y de otros componentes informáticos.

Por desgracia, el tamaño y el rendimiento de los dispositivos fotónicos está limitado por la difracción; además, las ondas de luz muy cercanas se interfieren y, por ello, el grosor de una fibra óptica que las conduzca ha de ser de al menos la mitad de la longitud de onda que tenga la luz al atravesar su material. En el caso de las señales ópticas en chips, que verosímilmente van a utilizar longitudes de onda de unos 1500 nanómetros, en el infrarrojo cercano, el grosor mínimo será mucho mayor que el de los dispositivos electrónicos más pequeños actualmente en servicio; en ciertos circuitos integrados de silicio hay transistores con elementos que miden menos de 100 nanómetros.

Desde tiempo reciente se viene trabajando en una nueva técnica de transmisión de señales ópticas a través de minúsculas estructuras de dimensiones nanométricas. En los años ochenta se confirmó experimentalmente que, al dirigir ondas luminosas a la interfase entre un metal y un dieléctrico (un material no conductor de la electricidad, como el aire o el vidrio), es posible, en condiciones adecuadas, inducir una interacción resonante entre las ondas y los electrones móviles de la superficie del metal. (Los electrones de un metal conductor no están fuertemente ligados a átomos o moléculas individuales.)

Dicho de otro modo: se puede lograr que las oscilaciones de los electrones de la superficie metálica sigan el ritmo que marca el campo electromagnético del exterior del metal. El resultado es la generación de plasmones de superficie, es decir, ondas de densidad de electrones que se propagan sobre la interfase como las ondulaciones que se difunden por la superficie de un estanque al tirar una piedra al agua.

Resumen/*Plasmónica*

- Se ha descubierto que es posible comprimir señales ópticas en hilos diminutos generando por medio de luz plasmones, que son ondas de densidad electrónicas.
- Los circuitos plasmónicos podrían facilitar la construcción de interconexiones rápidas que moverían grandes volúmenes de datos en los chips. Los componentes plasmónicos podrían, asimismo, mejorar la resolución de los microscopios, el rendimiento de los diodos fotoemisores y la sensibilidad de los detectores químicos o biológicos.
- Se conjetura incluso que los materiales plasmónicos podrían alterar el campo electromagnético en las inmediaciones de un objeto hasta el punto de tornarlo invisible.

A lo largo del decenio pasado se ha descubierto que resulta posible generar, mediante diseños imaginativos de la interfase metal-dieléctrico, plasmones de superficie que posean la misma frecuencia que las ondas electromagnéticas externas, aunque de una longitud de onda mucho menor. De ese modo, los plasmones podrían viajar por los "interconectadores" —hilos de tamaño nanométrico— y trasladar información de unas partes a otras de un microprocesador.

Los interconectadores plasmónicos les prestarían un gran servicio a los proyectistas de microchips, que, pese a que crean transistores cada vez más pequeños y rápidos, tropiezan con grandes dificultades al construir circuitos electrónicos minúsculos que muevan rápidamente datos a través del chip.

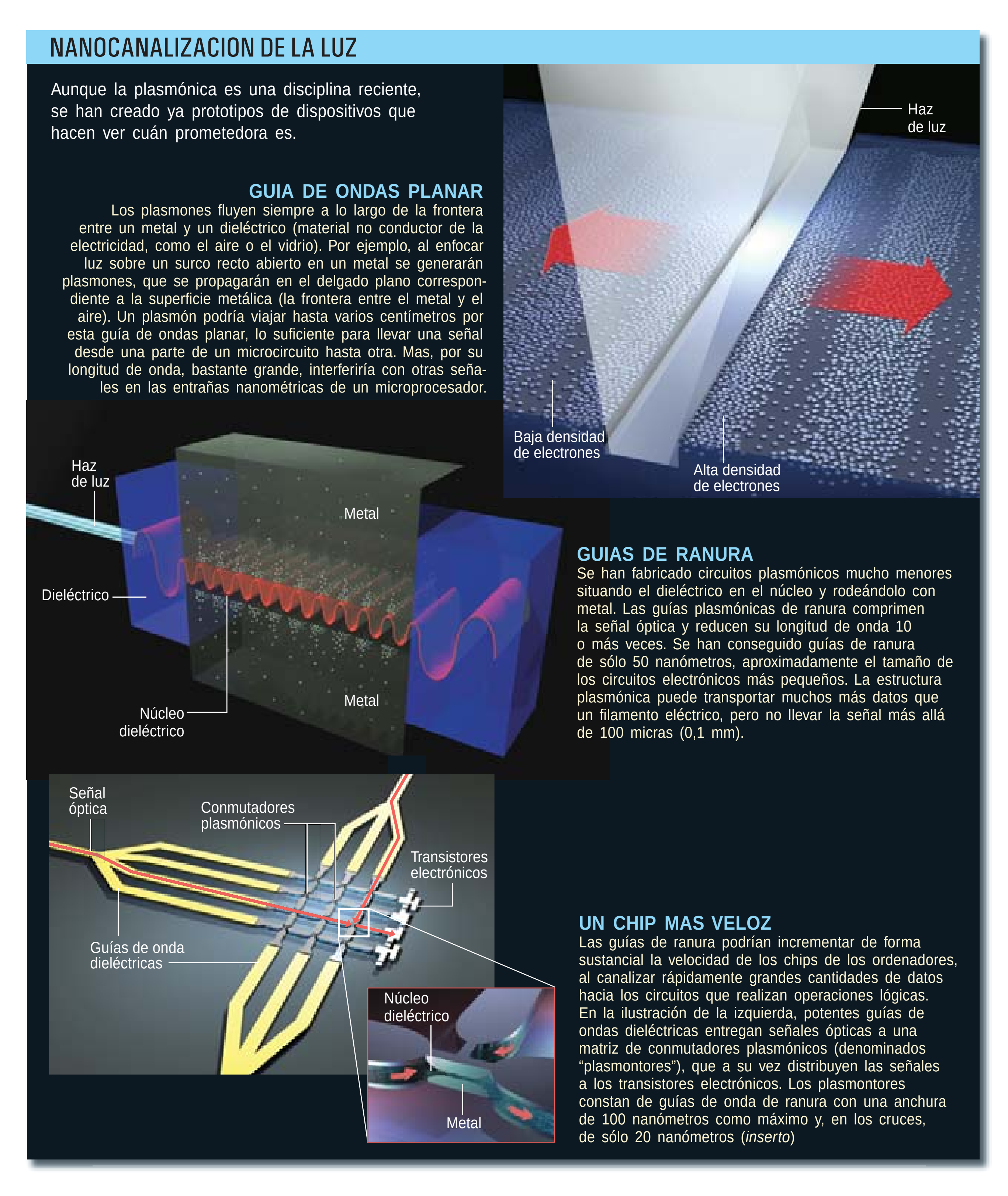
Mi grupo del Instituto de Tecnología de California le dio en el año 2000 el nombre de *plasmónica* a esta naciente disciplina. Percibimos que en el nuevo campo la investigación puede fructificar en dispositivos de un tipo de nuevo cuño. En última instancia, será factible dotar de componentes plasmónicos a instrumentos muy dispares y mejorar la resolución de los microscopios, el rendimiento de los diodos fotoemisores (LED) y la sensibilidad de los detectores químicos o biológicos.

Se están considerando también aplicaciones en medicina. Se podrían diseñar, por ejemplo, partículas diminutas que, valiéndose de la absorción de resonancias plasmónicas, mataran los tejidos cancerosos. Y hay incluso algún que otro investigador que ha teorizado que ciertos materiales plasmónicos podrían alterar tanto los campos electromagnéticos en las inmediaciones de un objeto, que éste se tornaría invisible. Aunque no todas esas aplicaciones hipotéticas resulten factibles, la plasmónica es objeto de intenso estudio porque este nuevo campo promete arrojar luz —y hacerlo en sentido estricto— sobre los misterios del nanomundo.

Contracción de longitudes de onda

Alquimistas y vidrieros llevaban milenios sacando partido, sin saberlo, de efectos plasmónicos. Así fue cuando crearon vidrieras policromadas o copas de color, que incorporan al vidrio pequeñas partículas metálicas. Tenemos el ejemplo más notable en la copa de Licurgo, un vaso romano del siglo IV d.C., hoy conservado en el Museo Británico. A causa de la excitación plasmónica de los electrones de las partículas metálicas en suspensión en la matriz vítrea, la copa absorbe y dispersa las luces azules y verdes, las longitudes de onda relativamente cortas del espectro visible. Cuando la copa se observa con luz que se refleja en ella, la dispersión plasmónica le confiere un tono verdoso; ahora bien, si dentro de la copa se coloca una luz blanca, el vidrio parecerá rojo porque transmitirá sólo las longitudes de onda de mayor longitud: las ondas cortas se absorberán.

La investigación sistemática de los plasmones de superficie comenzó en los años ochenta, cuando se los estudió por medio de la espectroscopía Raman, un método de observación y análisis de la dispersión de luz láser por una muestra cuya estructura se determina a partir de las vibraciones de las moléculas que la componen. En 1989, Thomas Ebbesen, por entonces del Instituto NEC de investigación, en Japón, descubrió que, al ilu-

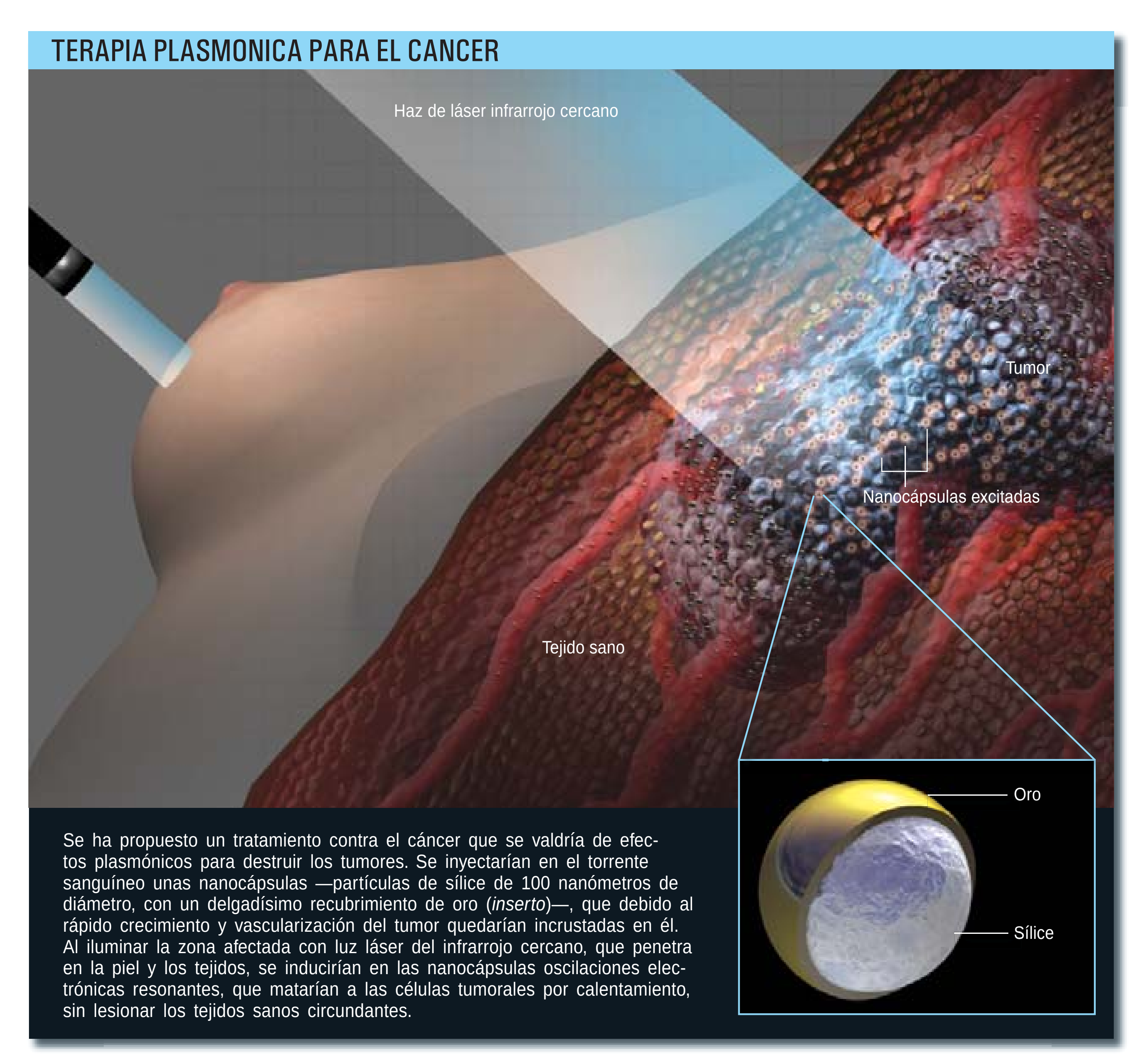


PHIL SAUNDERS *Space Channel Ltd.*

minar una finísima película de oro en la que se habían marcado millones de perforaciones microscópicas, la película transmitía más luz de la que sería de esperar en vista del número y tamaño de las perforaciones. Nueve años después, Ebbesen y sus colaboradores llegaron a la conclusión de que plasmones formados en la superficie de la película intensificaban la transmisión de la energía electromagnética.

La plasmónica recibió otro vigoroso impulso al descubrirse los “metamateriales”, materiales de nueva creación en los que las oscilaciones de los electrones pueden dar lugar a propiedades ópticas llamativas [*véase* “Superlentes y supermateriales”, por John B. Pendry y David R. Smith; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 2006]. Y dos tipos de nuevos instrumentos han acelerado también los progresos en plasmónica: los avances recientes

TERAPIA PLASMONICA PARA EL CANCER



Se ha propuesto un tratamiento contra el cáncer que se valdría de efectos plasmónicos para destruir los tumores. Se inyectarían en el torrente sanguíneo unas nanocápsulas —partículas de sílice de 100 nanómetros de diámetro, con un delgadísimo recubrimiento de oro (*inserto*)—, que debido al rápido crecimiento y vascularización del tumor quedarían incrustadas en él. Al iluminar la zona afectada con luz láser del infrarrojo cercano, que penetra en la piel y los tejidos, se inducirían en las nanocápsulas oscilaciones electrónicas resonantes, que matarían a las células tumorales por calentamiento, sin lesionar los tejidos sanos circundantes.

PHIL SAUNDERS *Space Channel Ltd.*

en potencia computacional y los métodos nuevos de construcción. Los progresos en potencia computacional han hecho posible simular con precisión los complejos campos electromagnéticos generados por los efectos plasmónicos. Los nuevos métodos de construcción de estructuras de escala nanométrica han hecho posible la elaboración y ensayo de dispositivos y circuitos plasmónicos ultrapequeños.

Podría parecer, a primera vista, que no resultaría práctico utilizar estructuras metálicas para la transmisión de señales lumínicas, pues es sabido que en los metales las pérdidas ópticas son muy elevadas. En el interior de un metal, los electrones más o menos libres que oscilan al compás del campo electromagnético impactan contra los átomos del retículo de átomos que tienen a su alrededor; así disipan rápidamente la energía del campo.

Pero las pérdidas de los plasmones en la interfase entre una delgada película metálica y un dieléctrico son mucho menores que las experimentadas en el seno del material, porque el campo se extiende al material no conductor, donde no existen electrones libres que puedan oscilar y, por consiguiente, no hay colisiones que disipen energía. Esta propiedad confina de forma natural los plasmones sobre la superficie metálica que linda con el dieléctrico; en un bocadillo compuesto por capas de metal y dieléctrico, los plasmones de superficie se propagan sólo en el delgadísimo plano situado en la interfaz.

Dado que estas estructuras plasmónicas planares actúan como las guías de ondas y dirigen las ondas electromagnéticas por la frontera entre metal y dieléctrico, podrían resultar útiles para encaminar señales en el interior de un chip. A pesar de que una señal óptica sufre mayor atenuación en un metal que en un dieléctrico como el vidrio, un plasmón puede viajar varios centímetros por una guía de ondas de película metálica delgada antes de extinguirse. La longitud de la propagación se puede maximizar, si la guía de ondas se vale de un modo asimétrico, que impulsa mayor porción de energía electromagnética hacia el interior del dieléctrico circundante, alejándola, en cambio, de la película metálica que actúa

de guía; con ello se reducen las pérdidas. Como los campos electromagnéticos presentes en las superficies superior e inferior de la película metálica interactúan uno con otro, se pueden ajustar las frecuencias y las longitudes de onda de los plasmones modificando el espesor de la película.

Grupos de investigación dirigidos por Sergey Bozhevolnyi, de la Universidad Aalborg, en Dinamarca, y Pierre Berini, de la Universidad de Ottawa, desarrollaron en los años noventa componentes plasmónicos planares que podían realizar muchas de las funciones —por ejemplo la separación de ondas guiadas— que habitualmente se realizan mediante dispositivos sólo dieléctricos. Estas estructuras podrían resultar útiles en la transmisión de datos de unas partes a otras de un chip, pero los campos electromagnéticos que acompañan a los plasmones son demasiado grandes para trasladar señales por los vericuetos nanométricos de un procesador.

Generación de plasmones

Para generar plasmones que se puedan propagar por hilos nanométricos, se han investigado guías de ondas de formas geométricas más complejas, capaces de contraer la longitud de onda de la señal "estrujándola" en un espacio más pequeño. En los últimos años del decenio pasado, el grupo de mi laboratorio y un equipo dirigido por Joachim Krenn, de la Universidad de Graz, emprendieron paralelamente trabajos encaminados a producir estas guías "sublongitud de onda" para plasmones de superficie.

Stefan Maier, trabajando con el autor en el Caltech, ha construido una estructura consistente en cadenas lineales de islotes de oro, de menos de 100 nanómetros de diámetro cada uno. Un haz de luz visible, con una longitud de onda de 570 nanómetros, desencadenó oscilaciones resonantes en los islotes y generó plasmones superficiales que se desplazaban a lo largo de las cadenas, confinados en una senda aplanada de sólo 75 nanómetros de altura.

El grupo de Graz consiguió resultados similares y logró, además, imágenes de las configuraciones de los plasmones trasladados por las cadenas. No obstante, las pérdidas por absorción en estos nanohílos fueron bastante elevadas, y la señal se extinguía apenas recorridos algunos centenares de nanómetros o unos pocos micrometros. Así pues, estas guías de onda sólo serían adecuadas para interconexiones de muy corto alcance.

Felizmente, las pérdidas por absorción se pueden minimizar volviendo de dentro afuera la guía de ondas, es decir, situando el dieléctrico en la zona central y emparedándolo en metal. En este dispositivo, llamado "guía de ranura" para ondas plasmónicas, la longitud de onda de los plasmones puede variarse ajustando el espesor del dieléctrico. Nuestro laboratorio del Caltech, y el grupo de Mark Brongersma, de la Universidad Stanford, han demostrado que las guías de ranura están capacitadas para transmitir una señal a distancias de decenas de micrometros. Hideki Miyazaki, del Instituto Nacional de Ciencia de los Materiales japonés, ha obtenido un resultado impresionante: al estrujar luz roja (de longitud de onda de 651 nanómetros en el vacío) mediante una guía de ranura que solamente tenía tres nanómetros de espesor y 55 nanómetros de anchura, halló que la longitud de onda del plasmón superficial que se propagaba por el dispositivo era de 51 nanómetros, es decir, el 8 por ciento de la longitud de onda en el espacio libre.

La plasmónica puede, pues, generar señales en la banda de longitudes de onda de los "rayos X blandos", que abarca de los 10 a los 100 nanómetros, por excitación de materiales mediante luz visible. La longitud de onda puede reducirse más de 10 veces con respecto a su valor en el vacío, y ello, manteniendo invariable la frecuencia de la señal.

La relación fundamental entre frecuencia y longitud de onda —frecuencia por longitud de onda es igual a la velocidad de la luz en el medio— sigue cumpliéndose: las ondas electromagnéticas viajan mucho más lentamente por la interfaz metal-dieléctrico. La sorprendente capacidad de contraer la longitud de onda abre la senda que puede conducir a estructuras plasmónicas de escala nanométrica que reemplacen los circuitos puramente electrónicos, de hilos y transistores.

Si ahora se recurre a la litografía para grabar configuraciones de circuito en chips de silicio, un proceso similar produciría en masa minúsculos dispositivos plasmónicos, consistentes en patrones de estrechas franjas y vanos dieléctricos. Esas configuraciones guiarían las ondas de cargas positiva y negativa sobre la superficie del metal; las densidades alternantes de carga se asemejan mucho a la corriente alterna que circula por un hilo conductor ordinario. Pero como la frecuencia de una señal óptica es tantísimas veces mayor que la de una corriente eléctrica doméstica —más de 400.000 gigahertz, frente a 50 o 60 Hz—, el circuito plasmónico transmitiría muchos más datos. Añádase que aquí la carga eléctrica no viaja desde un extremo de un circuito plasmónico hacia otro, sino que los electrones se concentran o dispersan, en lugar de fluir en una sola dirección; por este motivo, el dispositivo carece de los efectos resistivos o capacitivos que limitan el transporte de datos de los circuitos integrados provistos de interconexiones eléctricas.

Los circuitos plasmónicos serían todavía más veloces y útiles si se lograra diseñar un conmutador "plasmontor", un dispositivo de tres electrodos que tuviera propiedades afines a las de un transistor. Mi laboratorio del Caltech y otros grupos de investigación han desarrollado versiones de poca potencia de tal conmutador. Si se consiguieran plasmontores de rendimiento más elevado, podrían constituir el núcleo de un sistema ultrarrápido de procesamiento de señales, avance que podría revolucionar la informática dentro de 10 o 20 años.

Nanocápsulas y envolturas de invisibilidad

Los usos posibles de los dispositivos plasmónicos van mucho más allá de la pura computación. Naomi Halas y Peter Nordlander, de la Universidad Rice, han desarrollado unas estructuras, denominadas nanocápsulas, consistentes en una capa de oro muy delgada —de unos 10 nanómetros de espesor— depositada alrededor de la superficie entera de una partícula de sílice de unos 100 nanómetros de diámetro. La exposición a ondas electromagnéticas genera oscilaciones electrónicas en la cápsula; a causa de la interacción que acopla los campos de las superficies exterior e interior de la película, al variar el tamaño de la partícula y el espesor del reves-

timiento de oro cambia la longitud de onda a la que la partícula absorbe energía por resonancia. Resulta posible por ello diseñar las nanocápsulas de modo que absorban selectivamente longitudes de onda de sólo unos cientos de nanómetros (el extremo azul del espectro visible) o de hasta 10 micrometros (el infrarrojo cercano).

Este fenómeno ha convertido a las nanocápsulas en un prometedor medio para el tratamiento del cáncer. En 2004, Halas, en colaboración con Jennifer West, también de la Universidad Rice, inyectó nanocápsulas plasmónicas en el torrente circulatorio de ratones que tenían tumores cancerosos, y observó que las partículas no eran tóxicas. Más aún, las nanocápsulas mostraban mayor tendencia a quedar incrustadas dentro de los tejidos cancerosos de estos roedores que en los tejidos sanos, pues en los tumores, por su rápido crecimiento, afluye más sangre. (Puede también ligarse las nanocápsulas a anticuerpos, para asegurarse de que apuntan a los cánceres.)

Felizmente, los tejidos de animales y humanos son transparentes a la radiación de ciertas longitudes de onda del infrarrojo. Cuando las investigadoras enfocaron a través de la piel de los ratones luz láser infrarroja sobre los tumores, la temperatura de los tejidos cancerosos se elevó, en virtud de la absorción resonante de energía en las nanocápsulas incrustadas en ellos, desde los 37 ºC hasta unos 45 ºC.

El calentamiento fototérmico mató las células cancerosas y dejó ilesos los tejidos sanos circundantes. En los ratones tratados con nanocápsulas, todos los signos de cáncer habían desaparecido en el plazo de 10 días; en los grupos de control, los tumores continuaron creciendo rápidamente. La compañía Nanospectra Biosciences ha solicitado el permiso de la Administración de Fármacos y Alimentos estadounidense para llevar a cabo ensayos clínicos de terapia con nanocápsulas en pacientes con tumores de cabeza o cuello.

Los materiales plasmónicos pueden resultar revolucionarios en la industria de la iluminación; con ellos, los diodos fotoemisores (LED) alcanzarían a tener el brillo suficiente para competir con las lámparas de incandescencia. Desde los años ochenta, se sabía que la intensificación plasmónica del campo eléctrico en la frontera metal-dieléctrico podía incrementar el ritmo de emisión de fotones de tintes luminiscentes que se situasen cerca de la superficie del metal. Más recientemente, se ha evidenciado que este tipo de intensificación del campo puede elevar de forma impresionante las tasas de emisión de los islotes y los pozos cuánticos —diminutas estructuras semiconductoras que absorben y emiten luz— e incrementar por ende el rendimiento y el brillo de los LED de estado sólido.

En 2004, Axel Scherer, del Caltech, junto con colaboradores de la Nichia Corporation japonesa, demostró que, al recubrir la superficie de un LED de nitruro de galio con una matriz densa de nanopartículas plasmónicas (de plata, de oro o de aluminio), resultaba posible multiplicar por 14 la intensidad de la luz emitida.

Y lo que es más: las nanopartículas plasmónicas podrían hacer factible el desarrollo de LED de silicio. Tales dispositivos, que serían mucho más económicos que los LED corrientes de nitruro o arseniuro de galio, no se utilizan en la actualidad debido a su reducida tasa de emisión de luz. Mi grupo del Caltech, en colaboración con un equipo dirigido por Albert Polman, del holandés Instituto FOM de Física Atómica y Molecular, ha demostrado que al acoplar nanoestructuras plasmónicas de plata u oro a matrices de islotes cuánticos de silicio se podía decuplicar la intensidad de la luz emitida. Resulta posible, además, sintonizar la frecuencia de las emisiones intensificadas ajustando las dimensiones de las nanopartículas. Nuestros cálculos indican que un ajuste cuidadoso de la frecuencia de resonancia plasmónica y un control preciso de la separación entre las partículas metálicas y los materiales semiconductores pueden aumentar las tasas radiativas en más de 100 veces, con lo que los diodos fotoemisores de silicio brillarían con tanta fuerza como los dispositivos tradicionales.





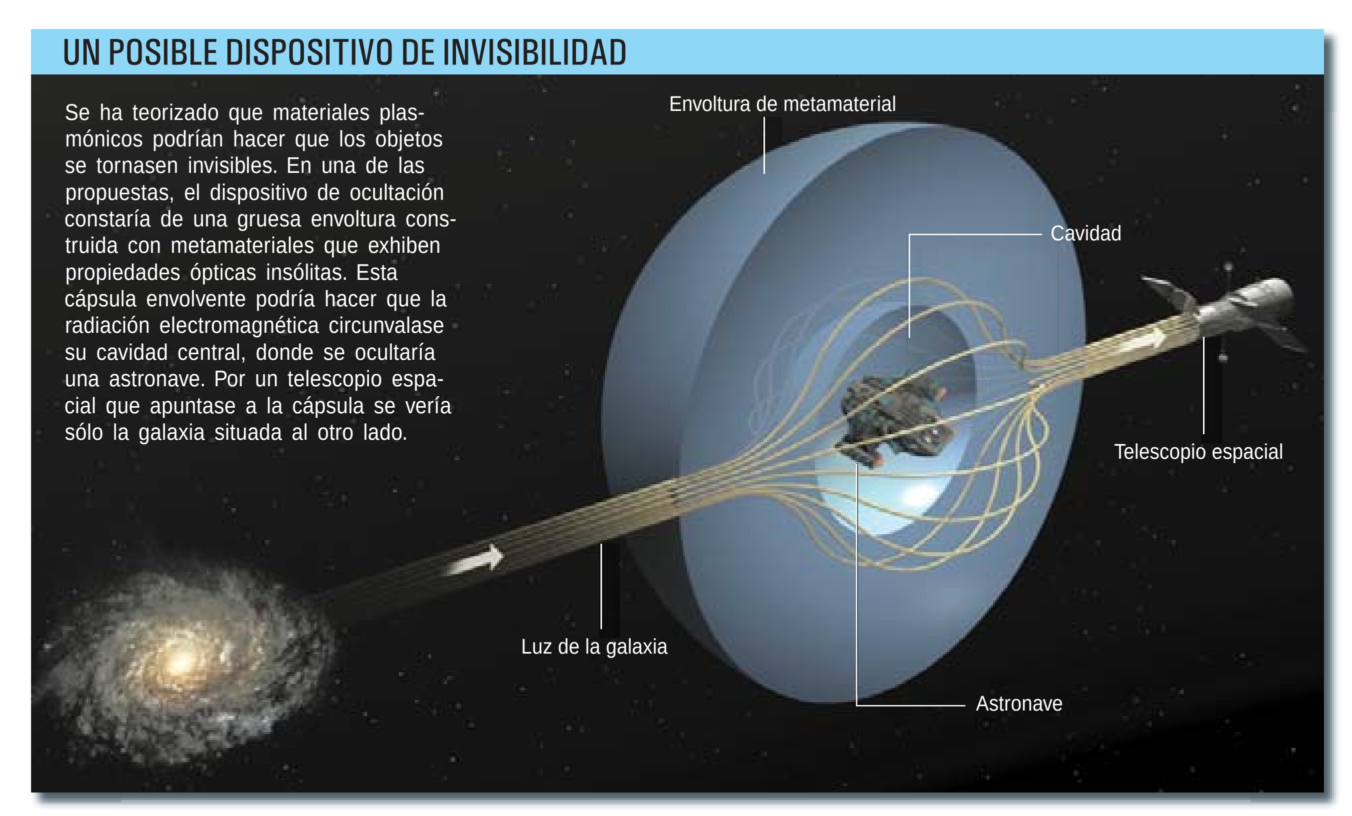
2. LA COPA DE LICURGO, un vaso romano del siglo IV d.C., cambia de color debido a la excitación plasmónica de partículas metálicas incrustadas en la matriz vítrea de la copa. Cuando se coloca una fuente de luz en su interior, el vaso, de color verdoso en condiciones normales, se vuelve de color rojo.

MUSEO BRITANICO, LONDRES, R.U./BRIDGEMAN ART LIBRARY

Otras aplicaciones

Se está trabajando incluso en una contrapartida plasmónica de un láser. Mark Stockman, de la Universidad estatal de Georgia, y David Bergman, de la Universidad de Tel Aviv, han descrito los aspectos físicos de un tal dispositivo, al que han llamado SPASER (sigla en inglés de amplificación por medio de plasmones superficiales de emisión estimulada de radiación). Aunque hasta ahora el SPASER existe solamente sobre el papel, se han sugerido posibles métodos de fabricación que emplean islotes cuánticos de semiconductor y partículas de metal. La energía radiativa emitida desde los islotes cuánticos se transformaría en plasmones, que se amplificarían después mediante un resonador plasmónico. Dado que los plasmones generados por un SPASER estarían mucho más estrechamente localizados que un haz de láser convencional, el dispositivo operaría a escasa potencia y excitaría

UN POSIBLE DISPOSITIVO DE INVISIBILIDAD



selectivamente objetos muy pequeños. En consecuencia, un SPASER aumentaría la sensibilidad de la espectroscopía y abriría el camino para detectores de materiales peligrosos que fueran capaces de detectar pequeñas cantidades de compuestos químicos o virus.

Es posible que la aplicación hipotética más fascinante de la plasmónica sean las envolturas de invisibilidad. H. G. Wells publicó en 1897 *El hombre invisible*, relato en el que un joven científico descubre la forma de hacer que el índice de refracción de su cuerpo sea el mismo que el del aire, lo que le vuelve invisible. (El índice de refracción de un material es la razón de la velocidad de la luz en el vacío a la velocidad de la luz en el seno del material.) La excitación de una estructura plasmónica con una radiación que esté próxima a la frecuencia de resonancia de la estructura puede hacer que su índice de refracción sea igual al del aire, lo que significaría que ni desviaría ni reflejaría la luz. La estructura absorbería luz. Pero si estuviera laminada con un material que produzca ganancia óptica —amplificando la señal transmitida exactamente como lo haría el resonador de un SPASER—, el aumento de intensidad podría compensar las pérdidas por absorción. La estructura se volvería entonces invisible, al menos para la radiación de una gama de frecuencias seleccionada.

Una verdadera envoltura de invisibilidad, sin embargo, tiene que ser capaz de ocultar cualquier cosa que se encuentre en el interior de esa estructura. Ha de funcionar para todas las frecuencias de la luz visible. La creación de semejante dispositivo sería más difícil, pero aun así, algunos físicos lo consideran posible. En 2006, el grupo dirigido por John B. Pendry, del Colegio Imperial de Londres, demostró que una cápsula de metamateriales podría, al menos en teoría, reencaminar las ondas electromagnéticas que viajan a su través, desviándolas en torno a una región esférica situada en su interior.

Aunque puede que el hombre invisible de Wells nunca llegue a ser realidad, las ideas anteriores reflejan la riqueza de propiedades ópticas que inspiran a los investigadores en el campo de la plasmónica. Al estudiar la complicada interacción entre ondas electromagnéticas y electrones libres se han identificado nuevas posibilidades de transmisión de datos en nuestros circuitos integrados, de iluminación de nuestros hogares o de lucha contra el cáncer. La exploración ulterior de estos apasionantes fenómenos plasmónicos puede fructificar en descubrimientos e inventos más extraordinarios todavía.

El autor

Harry A. Atwater es titular de la cátedra Howard Hughes y profesor de física aplicada y ciencia de los materiales en el Instituto de Tecnología de California (Caltech). Sus investigaciones se centran en dispositivos fotónicos a escala de sublongitud de onda, que pueden hallar aplicación en computación, técnicas de formación de imágenes y energías renovables.

Bibliografía complementaria

PLASMONICS: LOCALIZATION AND GUIDING OF ELECTROMAGNETIC ENERGY IN METAL/DIELECTRIC STRUCTURES. Stefan A. Maier y Harry A. Atwater en *Journal of Applied Physics*, vol. 98, n.º 1, 011101; julio de 2005.

PLASMONICS: MERGING PHOTONICS AND ELECTRONICS AT NANOSCALE DIMENSIONS. Ekmel Ozbay en *Science*, vol. 311, págs. 189-193; 13 de enero, 2006.

PLASMONICS: FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS. Stefan A. Maier. Springer Verlag, 2007.

Filamento de miosina

Modelo atómico

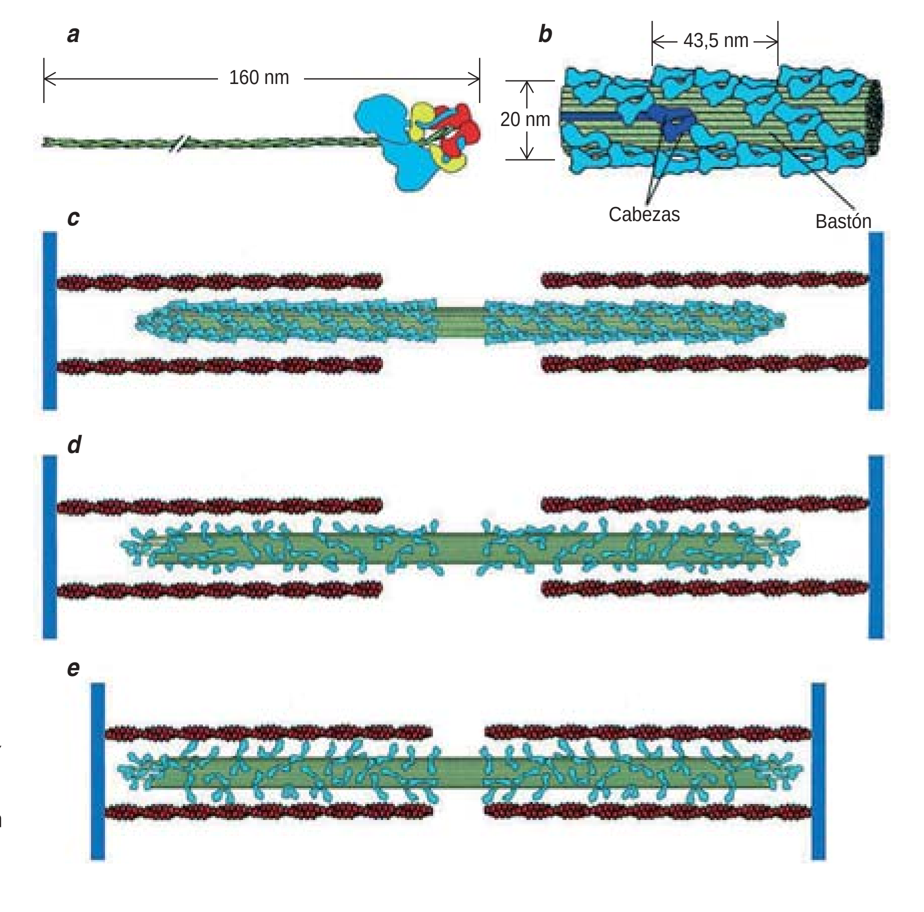
El mantenimiento, la división y el movimiento de las células requieren la operación de varios motores moleculares, lineales o rotatorios. Los motores son proteínas. Algunos, así la miosina, la kinesina o la dineína, se desplazan por "rieles" proteínicos (filamentos de actina o microtúbulos) en procesos cuya energía proviene de la hidrólisis del adenosintrifosfato (ATP). Por su tamaño macroscópico, el primer sistema motor que se estudió fue el músculo. Se proponía averiguar el modo en que se generaba y controlaba la fuerza muscular.

En 1954, Hugh Huxley y Andrew Huxley, de forma independiente, demostraron que los músculos estriados contienen miosina y actina. Descubrieron también que ambas proteínas forman un sistema mecánico, el sarcómero, que consta de dos conjuntos de filamentos interdigitados: los filamentos gruesos (de miosina) y los filamentos delgados (de actina), cuyo deslizamiento relativo causa el acortamiento del músculo.

Se conocen 17 tipos de miosina. En su mayoría constan de dos cabezas globulares. La miosina del músculo estriado, la miosina II, "camina" a lo largo de filamentos de actina; la fuerza ejercida promueve el deslizamiento de los filamentos delgados a lo largo de los gruesos, así como el acortamiento del sarcómero.

Hace poco más de un decenio se produjo un avance crucial para la dilucidación del mecanismo molecular de la contracción muscular. En 1993, el grupo que dirige Iván Rayment, de la Universidad de Wisconsin en Madison, cristalizó cabezas de miosina para determinar su estructura. El análisis, por cristalografía de rayos X, reveló que la cabeza constaba de dos dominios: uno globular y otro elongado.

El dominio globular, o motor, estaba constituido por el extremo N-terminal de la cadena pesada de la miosina, con un sitio de enlazamiento para ATP y un sitio para enlazamiento con actina. El dominio elongado, o regulador, en el que la cadena pesada, en conformación de α-hélice, tiene adosadas dos cadenas ligeras (una esencial y otra reguladora), que confieren rigidez a la cabeza y, en algunos músculos, controlan la actividad contráctil. El resto de la cadena pesada hasta el C-terminal se superenrolla con la cadena pesada de la otra cabeza, formando el bastón. El dominio regulador opera como



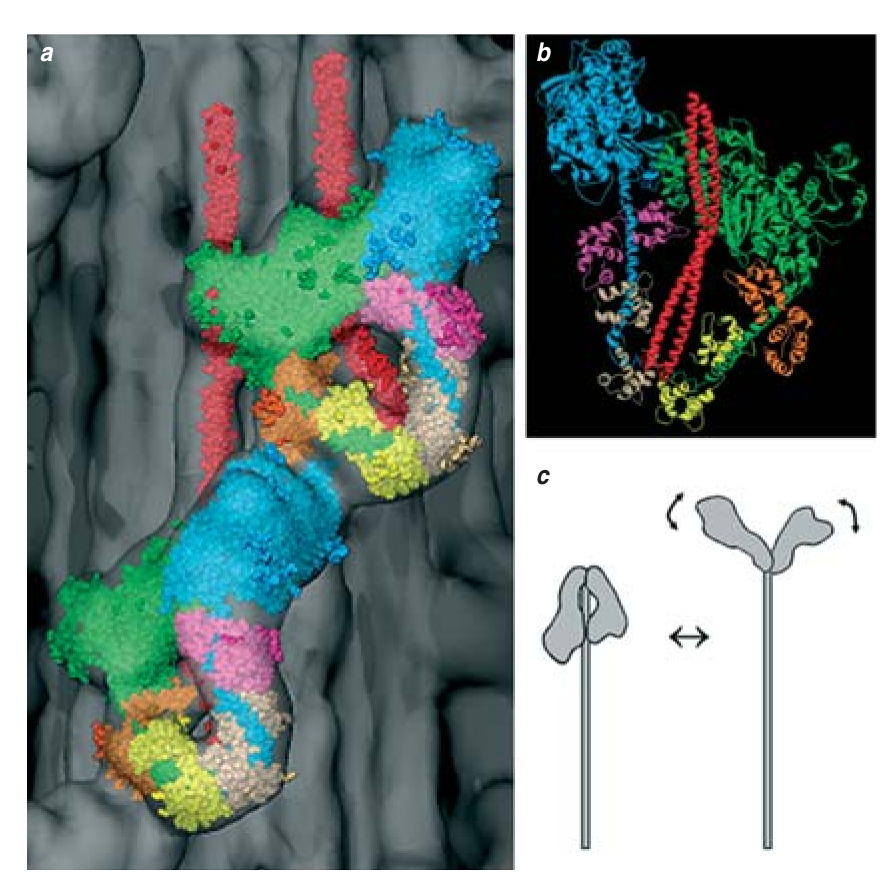
1. Estructura del filamento grueso del músculo estriado de tarántula (*b*). En el estado relajado, las cabezas rígidas de miosina (*a*) apuntan hacia el bastón de la miosina; las cadenas ligeras reguladoras están defosforiladas. Cada molécula de miosina (*a*) consta de dos cadenas pesadas (*azul*), que se superenrollan y generan un bastón (*verde*) en su extremo C-terminal y dos cabezas globulares (*azul*) en sus extremos N-terminales. Dos pares de cadenas ligeras se alojan en el cuello de ambas cabezas, llamadas reguladora (*rojo*) y esencial (*amarillo*). Esta estructura garantiza que las cabezas se mantengan plegadas sobre la superficie, de manera que no interactúen con los filamentos delgados (*c*). Cuando el Ca^{2+} se enlaza con la calmodulina, se activa una quinasa específica, que fosforila las cadenas ligeras reguladoras de la miosina. Se produce entonces la activación de los filamentos: se flexibilizan, se desordenan las cabezas, salen de la superficie (*d*) y se acercan a los filamentos delgados. Los filamentos gruesos activados interactúan con los filamentos delgados, si éstos se encuentran también activos; se estimula así la producción de fuerza y el deslizamiento de ambos filamentos entre sí, lo que acorta el sarcómero (*e*).

un brazo de palanca: acopla la fuerza generada por la interacción entre el dominio motor y la actina con el bastón. De esa acción resulta el cambio de conformación que desliza ambos filamentos entre sí.

En 1963 Hugh Huxley demostró, mediante microscopía electrónica y tinción negativa, que en los músculos estriados de vertebrado las miosinas se agregaban en filamentos bipolares. Los bastones ocupaban, apretados, el centro del filamento, mientras que las cabezas aparecían desordenadas en la superficie del esqueleto. Sin embargo, en 1967 el propio Huxley descubrió, mediante difracción de rayos X, que las cabezas de miosina no estaban desordenadas, sino que desarrollaban una estructura en hélice, con una repetición de 43 nanómetros y una distancia axial entre cabezas de 14,3 nanómetros.

A partir de 1980, con el fin de resolver la discrepancia entre la tinción negativa y la difracción de rayos X, varios grupos estudiaron la estructura de los filamentos gruesos mediante microscopía electrónica. En 1981, Robert Kensler, en el Colegio Médico de Pennsylvania en Filadelfia, y sus colaboradores visualizaron, mediante tinción negativa, la disposición en hélice de cabezas en filamentos gruesos del invertebrado *Limulus*. Asimismo, calcularon su reconstrucción tridimensional.

En 1985, con Anthony R. Crowther y Roger Craig, entonces en el Laboratorio de Biología Molecular MRC en Cambridge, obtuvimos micrografías electrónicas de filamentos gruesos de tarántula teñidos negativamente. Mediante una reconstrucción tridimensional a 5 nanómetros de resolución, resolvimos ambas cabezas de miosina: en el estado relajado, las cabezas de miosina formaban 4 hélices. En 1987, descubrimos, con Craig, de la Escuela de Medicina de la Universidad de Massachusetts, y John Kendrick-Jones, del Laboratorio de Biología Molecular MRC en Cambridge, que la activación producía el desordenamiento de las cabezas, causado por la fosforilación de las cadenas ligeras reguladoras de la miosina. Resultaba evidente la importancia de la transición orden-desorden de las cabezas para la relajación y activación de la contracción muscular.



2. Modelo atómico del filamento grueso de músculo estriado de tarántula (*a*). Se muestran dos miosinas (*color*) y el mapa tridimensional (*gris*). Se observan dos interacciones intermoleculares: una entre el dominio enlazador de actina de una cabeza (*azul*) con la cadena ligera esencial (*naranja*) de la cabeza vecina (*verde*), y otra entre el bastón (*rojo*) y el dominio SH3 de la cabeza vecina (*verde*). Modelo atómico de la molécula de miosina relajada (*b*). Muestra tres interacciones intramoleculares: una entre el dominio enlazador de actina de una cabeza (*verde*) y la cadena ligera esencial (*lila*) de la otra cabeza (*azul*); una segunda, entre el mismo dominio y el dominio convertidor de la otra cabeza (*azul*); y otra tercera, entre el mismo dominio y el subfragmento S2 (*rojo*) del bastón. Diagrama de una miosina (*c*). A la izquierda, la estructura relajada (cadenas ligeras defosforiladas), con ambas cabezas rígidas y en mutua interacción. A la derecha, activada, con ambas cabezas móviles y desordenadas (cadenas ligeras reguladoras fosforiladas).

MODIFICADO DE WOODHEAD, ZHAO, CRAIG, EGELMAN ALAMO Y PADRON EN *NATURE*, VOL. 436, PAGS. 1195-1199; 2005

En colaboración con el grupo de Craig obtuvimos, mediante criomicroscopía electrónica, micrografías electrónicas de filamentos gruesos de tarántula congelados e hidratados. El método permitía calcular estructuras tridimensionales en hélice a mayor resolución. En 2004, gracias a la técnica de reconstrucción iterativa en hélice en espacio real, desarrollada por Edward Egelman, de la Universidad de Virginia, aumentamos la resolución hasta 2,5 nanómetros. Ajustamos luego la estructura atómica de las cabezas de miosina de músculo liso de vertebrado (determinada por el equipo de Kenneth Taylor, de la Universidad estatal de Florida en Tallahassee), al mapa tridimensional. ¿Qué observamos?

Ambas cabezas de la molécula de miosina interactuaban entre sí. Se distinguían, en concreto, tres interacciones intramoleculares (dos cabeza-cabeza y una cabeza-bastón), que mantenían plegadas las dos cabezas sobre la superficie del esqueleto, y dos interacciones intermoleculares, entre miosinas vecinas (una cabeza-bastón y otra cabeza-cabeza).

Estas cinco interacciones explicaban la formación —regulada por la miosina— de las hélices de cabezas asociadas al estado relajado de los filamentos gruesos en músculo liso y estriado en un amplio rango de especies.

De forma inesperada, la estructura atómica de miosina de músculo liso de vertebrado se ajustó a la reconstrucción tridimensional de un filamento grueso de músculo estriado de invertebrado. La precisión del ajuste entre sistemas tan distantes (desde el punto de vista evolutivo) sugería que la estructura de cabezas interactuantes podía constituir un motivo general para el estado relajado de filamentos gruesos de miosina regulados por fosforilación en músculos estriados y lisos de numerosas especies.

La activación de los filamentos gruesos se producía por la debilitación de estas interacciones. Acontecía ese fenómeno tras fosforilarse las cadenas ligeras reguladoras, cuando el Ca^{2+} activaba al complejo calmodulina-quinasa de cadena ligera de la miosina. El modelo atómico del filamento grueso de miosina abre las puertas para dilucidar el mecanismo molecular de la activación de la contracción muscular mediante la fosforilación de las cadenas ligeras reguladoras.

RAÚL PADRÓN
Departamento de Biología Estructural,
Instituto Venezolano
de Investigaciones Científicas
Caracas
Instituto Howard Hughes
de Investigaciones Médicas

Diferencias sexuales en el envejecimiento

¿Por qué los machos suelen envejecer y morir antes que las hembras?

El sentido biológico del envejecimiento constituye una de las cuestiones candentes de la investigación sobre biología evolutiva. Por envejecimiento se entiende la pérdida progresiva de funcionalidad acompañada por la reducción en las probabilidades de supervivencia y reproducción conforme avanza la vida de un organismo. Dado que la selección natural promueve la supervivencia para maximizar la reproducción, ¿por qué aparece de modo inexorable un límite en la vida, a partir del cual el organismo degenera en su capacidad de mantenerse en buen estado de funcionamiento, con la consiguiente merma de sus posibilidades de supervivencia y reproducción, sin que la selección natural se oponga?

Cuando aún se pensaba en términos del “bien de la especie”, se veía en el envejecimiento un mecanismo de la selección natural para favorecer la renovación de los individuos. Sin embargo, esta idea resultó del todo inadmisible una vez que la biología entendió que la selección de organismos y genes es enormemente más eficaz que la selección de grupos o especies.

Hoy existen tres hipótesis principales sobre el envejecimiento. Consistiría, según la primera, en la acumulación de mutaciones cuando la selección en su contra es débil. Según la segunda, el envejecimiento se debería a los efectos perjudiciales que a edades avanzadas podrían ejercer genes que la selección, sin embargo, habría favorecido por producir efectos positivos en la juventud (efectos “pleiotrópicos”). Y según la tercera hipótesis, la senescencia sería la consecuencia de que se reparasen menos las estructuras corporales cuando no fueran útiles para la reproducción (hipótesis del soma desechable).

Las tres hipótesis coinciden en que si la esperanza de vida se alarga o se acorta por razones distintas del envejecimiento (por ejemplo por el impacto de la depredación) los procesos de envejecimiento tenderán a retrasarse o a adelantarse, respectivamente. Un matiz importante: la clave no sería en realidad la duración de la vida, sino la *duración de la vida reproductiva*.

La selección natural actúa en virtud de las diferencias en el éxito reproductor. Por tanto, una vez terminada la vida fértil de un organismo, su longevidad resulta irrelevante a los ojos de la selección (aunque hay alguna excepción). Se ha comprobado que si un linaje de moscas de la fruta es obligado experimentalmente a reproducirse sólo cuando los individuos son jóvenes, tras varias generaciones los procesos de envejecimiento empezarán a aparecer a edades más tempranas.

La duración de la vida fértil depende del tipo de estrategia reproductiva. Las estrategias reproductivas son diferentes si se trata de machos o de hembras. Una hembra es un organismo productor de gametos grandes mientras que un macho es un productor de gametos pequeños. La especialización en la producción de gametos pequeños se asocia, en un principio, al éxito que suponen los apareamientos múltiples. Es decir, la dotación genética de un individuo estará más representada en la siguiente generación cuanto mayor sea el número de parejas a las que consiga fecundar. Esta estrategia conlleva por definición una situación de competencia con los demás machos, dando lugar a la selección sexual. En la medida en que las estrategias de los machos de una especie se aparten de las estrategias de las hembras, podrá diferir el período de la vida en que tiene lugar la reproducción.

En muchas especies, los machos han de imponerse, por la fuerza, a otros para poder acceder a las hembras. El ciervo es uno de los ejemplos más claros. A él hemos dedicado buena parte de nuestra investigación. Cuando los machos necesitan ganar en las luchas frente a otros machos, deben alcanzar considerable tamaño e incluso desarrollar armas (cuernas) para contar con alguna posibilidad de reproducirse. Pero, lo que es más relevante, difícilmente podrán mantenerse muchos años en la elite de luchadores. A diferencia de las hembras, que producen un cervatillo al año durante casi 20 de vida, los machos basan su éxito en fecundar a cuantas hembras puedan en los pocos años en que permanecerán en la cima.

Los ciervos macho reúnen los harenes de hembras en el intervalo de los cinco a los nueve años de edad, con una mayor intensidad entre los seis y los ocho. No suelen sobrevivir más allá de los 12 o 13 años. La selección sexual ha acortado la vida reproductiva de los machos respecto a las hembras. La consecuencia esperada de este “experimento natural” es que el envejecimiento aparezca a edades más tempranas en los machos. No sólo los machos mueren antes que las hembras, sino que muestran además signos evidentes de envejecimiento prematuro. Si nos fijamos en los molares, en los machos se encuentran completamente gastados a la edad de 10-12 años, mientras



Macho de ciervo con hembras durante el celo. Las estrategias reproductivas en machos y hembras son muy diferentes, como lo es la selección sexual, que produce diferencias en múltiples aspectos de sus vidas, incluido el envejecimiento.

que en las hembras duran hasta casi los 18-20. Se admite sin discrepancia que una aparición temprana de los procesos de envejecimiento indica una vida fértil más corta.

Al estudiar los dientes de los ciervos encontramos un hecho que servía de apoyo a la teoría del soma desechable. Los dientes de los ciervos, como los de muchos otros animales, no se reparan durante la vida del individuo. El tamaño con el que emergen persistirá a lo largo de la vida. Si los machos, por ser de mayor tamaño, necesitan procesar más cantidad de alimento y, por tanto, sus dientes sufren mayor desgaste, deberían producir dientes mayores para que durasen más. Sin embargo, los dientes de los machos (los molares en concreto) son, con respecto al peso corporal, más pequeños que los de las hembras. Aun sin corregir por el tamaño corporal, son casi de igual tamaño que los de las hembras. La consecuencia es que duran menos.

Un macho a los 10-12 años se ha quedado sin dientes, pero eso no importa a los ojos de la selección, porque las posibilidades reproductivas a partir de esa edad serían nulas. Los dientes se producen del tamaño necesario para la duración de la vida reproductiva, pero no más allá. Ello apoya la idea de que la reparación de las estructuras corporales sólo se lleva a cabo en función de beneficios reproductivos esperados. Y sugiere que muchos procesos de envejecimiento no son más que el resultado de la incapacidad de la selección para aumentar una durabilidad de las estructuras corporales que no repercuta en un mayor éxito reproductivo.

En la historia evolutiva del ciervo se produjo un aumento progresivo del tamaño corporal, acompañado por un aumento en el tamaño de los dientes de las hembras porque la selección premió en ellas la longevidad, que se traducía en un mayor número de cervatillos a lo largo de su vida. En los machos, en cambio, parece que no hubo suficiente fuerza de la selección para el aumento de tamaño de los dientes, ya que eso no se traducía en más éxito reproductivo.

El ciervo es un ejemplo, pero hay muchas especies en que machos y hembras siguen procesos de envejecimiento distintos, en numerosas ocasiones asociados a diferencias provocadas por la selección sexual. Nuestra propia especie tiene tras de sí una historia evolutiva en la cual el sistema de apareamiento predominante era moderadamente poligínico: los machos podían tener varias parejas en función de su rango social. En la medida en que el estatus en nuestros antepasados lejanos dependiera de la fuerza física, la situación podría parecerse a la del ciervo.

Todavía hoy, los hombres tienen mayor tamaño corporal que las mujeres, viven menos años que ellas y manifiestan fenómenos de envejecimiento más tempranos. La menopausia da la impresión de no encajar en este patrón, pero ha aparecido en nuestra especie por una razón diferente al envejecimiento. Recientemente, un grupo de investigadores ha escudriñado los archivos demográficos de poblaciones humanas del norte de Escandinavia, recogidos desde hace siglos en Finlandia, y ha averiguado que la longevidad infértil de las mujeres estaba relacionada con la supervivencia y éxito final de sus nietos, mientras que en los hombres no se encontró esta relación. La menopausia parece, por tanto, una adaptación hacia la permanencia de los genes de la abuela, que pueden favorecerse más si las mujeres a partir de cierta edad ayudan a sacar adelante a los nietos en lugar de producir más hijos.

Los experimentos realizados con *Drosophila melanogaster* parecen sugerir que, en la medida en que la reproducción ocurra más tarde en la vida, podría tenderse a retrasar los fenómenos de envejecimiento. ¿Ocurre ese proceso en nuestra especie? Es cierto que la reproducción se da a edades cada vez más avanzadas en las sociedades modernas, mas para que la selección natural produjese algún efecto debiera acontecer también que los que están en mejores condiciones (con menores signos de envejecimiento) en edades avanzadas dejaran un mayor número de descendientes. Y ése no parece ser el caso. No podemos esperar que la selección natural haga nada por mejorarnos. Antes bien, si la selección, que se basa en diferencias en éxito reproductor asociadas a caracteres adaptativos, es débil, difícilmente podrá mantenerse por mucho tiempo el diseño de nuestras estructuras y la efectividad de nuestro funcionamiento biológico natural.

JUAN CARRANZA
Unidad de Biología y Etología,
Area de Zoología
Universidad de Extremadura (Cáceres)

Covadonga Orejas, Andrea Gori y Josep-Maria Gili

Corales fríos

Siempre se han asociado los corales y en especial las formaciones arrecifales a las aguas someras de los mares tropicales. Sin embargo, no están confinados allí de manera exclusiva. Medran también en los mares templados e incluso en los fríos. De hecho en las frías aguas antárticas habitan diversas especies de corales. Para distinguirlos de sus parientes de aguas cálidas, los corales de aguas frías y templadas son denominados “corales fríos”. Pero no es sólo la temperatura lo que diferencia a los corales tropicales de los corales fríos: la fuente de energía de la que obtienen su alimento es otro de los caracteres diferenciadores de estos dos tipos de corales.

Los corales tropicales viven en simbiosis con algas microscópicas: las zooxanthellas. Los corales fríos han adoptado una estrategia necesariamente distinta, pues habitan a profundidades a las cuales la radiación solar no penetra con intensidad suficiente para realizar la fotosíntesis y, por tanto, las zooxanthellas no pueden desarrollarse en estos hábitats.

Los corales fríos se alimentan de presas vivas (zooplancton) o de partículas orgánicas de pequeño tamaño disueltas en el agua que los rodea. El hecho de capturar presas, a veces de tamaños considerables (2 centímetros o más) es una de las razones de que estos organismos hayan desarrollado pólipos de gran tamaño en comparación con los de los corales de aguas cálidas.

Los corales fríos difieren también de los tropicales en su arquitectura; mientras que la mayoría de los corales de aguas cálidas son masivos y con diversidad de formas, los corales de profundidad presentan un aspecto ramificado, dendriforme. Esa estructura constituye lo mismo en corales de aguas cálidas que en corales de aguas frías el cobijo de muchas especies de pequeños invertebrados, en particular de sus fases larvarias. Así los corales fríos son el equivalente a los árboles en las profundidades marinas. Con su tridimensionalidad dan origen a un ecosistema variado en microhábitats, rico en diversidad de especies.



1. Pólipos de *Lophelia pertusa*. Se observan las acumulaciones de células urticantes o cnidocitos en forma de gránulos blancos en la superficie de los tentáculos.



2. Pólipos de *Dendrophyllia cornigera*, una de las especies de corales fríos con el mayor tamaño de pólipo, alcanzan hasta 2 centímetros de diámetro.

3. Colonia de *Madrepora oculata*. Las colonias de esa especie miden hasta medio metro de altura.



4. Comunidad de corales fríos en el cañón submarino del cabo de Creus. Lo mismo que los árboles en un bosque, los corales ofrecen cobijo a numerosas especies, sobre todo, fases larvarias de peces e invertebrados.

La inteligencia de los cuervos

BERND HEINRICH Y THOMAS BUGNYAR

Un trampero de los bosques norteños ve que un cuervo común *(Corvus corax)* se tiende sobre su dorso, las patas en el aire, junto a un cadáver de castor que hay sobre la nieve. Un biólogo trepa trabajosamente por un acantilado para anillar a pollos de cuervo y los padres de los volantones hacen caer sobre él una lluvia de piedras sueltas. Hay un hombre en una remota cabaña que oye el graznido de un cuervo solitario; levanta la vista y se apercibe de que un puma oculto está a punto de saltar sobre él.

Las tres personas del relato creían conocer la intención de los cuervos. El trampero pensó que el cuervo se hacía el muerto, como si se hubiera envenenado, para mantener alejados a otros cuervos y disponer del cadáver de castor él solo. El biólogo pensó que la pareja de aves intentaba golpearle deliberadamente con las piedras para que se alejara. El hombre de la cabaña pensó que el cuervo lo había alertado para salvarle la vida.

No cabe descartar estas hipótesis, pero quienes conocemos bien a los cuervos podríamos ofrecer explicaciones más probables. Los cuervos, quizá las aves más juguetonas, se tienden a menudo sobre su lomo, por pura diversión al parecer. Suelen golpear el punto de apoyo encolerizados, dondequiera que se hallen posados, cuando hay un depredador cerca de su nido. Y se sabe que han guiado a carnívoros hacia presas a las que no pueden vencer; el cuervo pudo haber guiado al puma hasta el hombre.

Las anécdotas sobre cuervos son innumerables. Muchas hablan de su inteligencia. Pero no proporcionan pruebas de que posean un ingenio diabólico. Ni siquiera los comportamientos más refinados —trocear un bloque de sebo en pedazos para llevarse porciones manejables, apilar galletas de forma precisa para poder volar con todo el montón, manipular dos rosquillas de modo que puedan transportarlas a la vez o preparar falsos escondites de comida que despisten a los merodeadores— demuestran que sopesen de manera consciente acciones alternativas, para elegir la apropiada.

Al fin y al cabo, la mera observación no obliga a descartar otras posibilidades; así, el instinto o un aprendizaje que permita realizar de corrido determinadas acciones. Hasta los años noventa, sólo se disponía de una prueba científica de rigor que indujera a admitir un razonamiento lógico entre los cuervos, del tipo que damos por sentado en los humanos. Se trataba de un conjunto de experimentos publicados en 1943 por Otto Koehler, del que fuera Instituto Zoológico de Königsberg. Koehler demostró que su cuervo doméstico de 10 años de edad, Jakob, podía contar hasta siete tras haberlo adiestrado para obtener comida de debajo de uno de varios contenedores

JEN CHRISTIANSEN



Experimentos recientes demuestran que estas aves utilizan la lógica para resolver problemas y que algunas de sus capacidades se acercan a las de los grandes simios, si no las superan

que poseían un número distinto de lunares en la tapa.

Mas la investigación acometida, en los últimos años, en buena medida por los dos autores de este artículo, ha aportado pruebas contundentes sobre la inteligencia real de los cuervos, entendida como el recurso a la lógica para resolver problemas. Descubrimos, para nuestro asombro, que pueden incluso distinguir a un individuo de otro. También en este sentido son muy parecidos a los humanos; no podríamos formar sociedades (excepto que se parecieran a las de los insectos) sin dicha capacidad.

Prueba de que resuelven problemas

Los cuervos no son las únicas aves con fama de listas. Desde hace veinte años se vienen acumulando estudios que nos muestran que algunos de sus parientes de la familia Córvidos (las cornejas, grajas y chovas, así como los arrendajos, urracas, rabilargos y cascanueces) poseen capacidades mentales sorprendentes y complejas, que en algunas de esas especies parecen equivalentes a las de los grandes simios, si no las superan.

Los cascanueces tienen una memoria fenomenal, que les permite retener miles de localizaciones de escondites de comida, tarea que pondría a prueba a un ser humano. Se ha demostrado que la grajilla de Nueva Caledonia *(Corvus moneduloides)* fabrica útiles con trozos de hojas de *Pandanus* para extraer queresas de las grietas de los troncos. Se ignora, sin embargo, en qué medida estos logros notables implican una ciega programación innata, memoria y aprendizaje de rutinas (mediante pruebas y errores pasados) y en qué medida dependen del razonamiento (la elección entre alternativas que se representan en la mente y son evaluadas).

Hemos diseñado experimentos para intentar distinguir el papel y la importancia relativa de tales posibilidades. En el primero poníamos a un cuervo ante comida colgada de un cordel. Para hacerse con la pitanza, tenía que inclinarse desde un posadero, agarrar el cordel con el pico, tirar de él, apoyar el cordel sobre el posadero, pisarlo y aplicar la presión adecuada para que no se escurriera, soltar el cordel, inclinarse de nuevo y repetir esta secuencia seis o más veces seguidas.

Vimos que los cuervos maduros, al menos algunos, examinaban la situación sin interrupción durante varios minutos y después realizaban los varios pasos de este procedimiento al primer intento y en sólo 30 segundos, sin haber tenido que esforzarse antes con pruebas y errores. En la "conformación" clásica del comportamiento de los animales de laboratorio, los pasos deseados se recompensan con comida, mientras que los pasos en falso se castigan con una descarga eléctrica. Las conexiones de la secuencia se establecen, presumiblemente, sin que el animal haya de comprender de qué manera contribuye cada nexo al resultado global. Sin embargo, nuestros animales no habían encontrado esta tarea en la naturaleza; por lo tanto, no podían haber aprendido a ejecutarla en el pasado, mediante pruebas y errores. De ahí que lo más sencillo consista en suponer que imaginaron posibilidades y dedujeron qué pasos debían dar.

Pero pasar la prueba requería madurez. Las aves jóvenes (un mes o dos después de la fase de volantón) son incapaces de ese comportamiento complejo. Y resolver el problema les lleva a los cuervos de un año de edad, por término medio, seis minutos, durante los cuales ensayan varias posibilidades (volar hacia la comida, intentar desgarrar el cordel, picotearlo, retorcerlo o darle tirones).

1. PARA OBTENER UNA RECOMPENSA suspendida de un cordel atado a un posadero, un cuervo ha de seguir una secuencia de pasos: alcanzar y agarrar el cordel, tirar del mismo, poner el cordel izado sobre el posadero, pisarlo con la presión suficiente para mantenerlo allí, soltar el cordel y repetir el proceso. Algunos cuervos maduros estudiaron la situación durante varios minutos y después realizaron todo el proceso al primer intento, señal de que utilizaron la lógica.

JEN CHRISTIANSEN

Ningún paso de la secuencia de cobrar el cordel era recompensado con comida; el cuervo tenía que realizarla entera si quería comer. Podría aducirse que cada paso se recompensaba "mentalmente" y, por lo tanto, se reforzaba, toda vez que el acceso a la comida se hallaba más cerca; el animal no tendría por qué saber que cada paso de la secuencia lo iba aproximando a su objetivo. Pero esta explicación no se sostiene. Si cada paso se adquiriera mediante aprendizaje por prueba y error, requeriría numerosas pruebas, y la secuencia de halar del cordel necesitaría seguramente meses de adiestramiento. No hubo tal. Las aves se comportaron como si conocieran qué estaban haciendo.

Resumen/*La inteligencia de los cuervos*

- Aunque el comportamiento ingenioso de los cuervos convence a la mayoría de su inteligencia, no prueba que sopesen conscientemente alternativas y escojan la mejor.
- Los autores buscaron la prueba con experimentos en los que se halaba un cordel del que pendía un pedazo de carne o se escondía comida ante competidores.
- Encontraron que los cuervos pueden usar la lógica para resolver problemas y distinguir individuos (tanto seres humanos como otros cuervos) y atribuirles conocimiento.

Sólo podíamos averiguar que sabían lo que hacían si cumplían determinadas predicciones. Si los cuervos sabían lo que estaban haciendo, debían conocer también lo que habían hecho: por ejemplo, saber que después de haber izado la comida atada al cordel, la comida seguía atada al posadero. Para descubrir si lo comprendían, hacíamos que se alejaran del posadero después de que hubieran izado la comida. Si dejaban caer la comida, suponíamos que sabían que estaba atada al posadero; si salían volando con la comida (y ésta les era arrancada del pico con el tirón), que no lo sabían. La mayoría la dejaban caer, aunque siempre se iban con carne atada al cordel cuando éste se hallaba sobre el posadero pero no atado a él.

El conocimiento requiere escasos tanteos, si alguno, mientras que el aprendizaje por ensayo y error no requiere lógica. Ideamos una comprobación más, que nos permitiese dilucidar si los cuervos no habrían resuelto el problema de izar la carne sin la mediación de la lógica, sino gracias a movimientos aleatorios que por causalidad se vieron recompensados. Esta vez confrontamos aves aún sin resabiar con las mismas elecciones físicas; lo hicimos, sin embargo, en una situación que esperábamos fuera para ellas ilógica, a saber: un cordel atado al posadero del que había que tirar hacia *abajo* para que la comida subiera.

En esta situación, los cuervos seguían estando interesados por la comida; investigaban la instalación y picoteaban y tironeaban del cordel, con lo que a veces hacían que la comida estuviera un poco más cerca. Sin embargo, pronto abandonaban, y ninguno aprendió a acceder a la comida aunque las mismas secuencias de izar/pisar/soltar que antes facilitaron la comida *podrían* habérsela proporcionado de nuevo. Por lo tanto, creemos que los tirones directos se aprendieron pronto y a veces casi "instantáneamente" sólo porque estaban apoyados en la lógica. Al parecer, los cuervos tienen la capacidad de probar acciones en su mente y prever sus resultados. Probablemente, esta capacidad falta, o está presente sólo en una medida limitada, en la mayoría de los animales. Será por una buena razón adaptativa.


2. ANTE LA TESITURA de tener que tirar de un cordel hacia *abajo* para que la comida suba, parece que los cuervos inexpertos (los que no habían dominado el sistema de izar la comida atada a un cordel) llegaron a la conclusión de que tirar hacia abajo para que algo suba era ilógico, y pronto desistieron. (La malla de alambre impedía que las aves izaran el cordel.)

JEN CHRISTIANSEN

Los beneficios de la inteligencia

Por uno de los grandes misterios de la biología, comportamientos de la mayor precisión están programados genéticamente en animales cuyo cerebro no es mayor que la cabeza de un alfiler. Una avispa elabora papel de manera experta desde el momento en que nace y modela un nido de exacta arquitectura con dicho papel. Otra avispa, en cambio, construye con fango un nido de mortero de modo muy distinto, pero no menos específico. Las distintas especies de aves se hallan programadas para hacer nidos conforme a un patrón predeterminado. Las golondrinas comunes construyen nidos de repisa con barro, que se endurece al secarse. Las golondrinas de acantilado construyen nidos en forma de horno, de barro también, aunque con un pequeño agujero redondeado como entrada.

Ninguno de estos comportamientos, ni los más intrincados, es aprendido, ni depende de la capacidad de pensar (aunque el aprendizaje y la capacidad de pensar pueden modificar algunos comportamientos programados genéticamente). El pensamiento y la lógica pueden ser muy poco fiables y crear gran confusión, como sabemos los humanos. Así pues, la cuestión crucial es: si la conducta puede preprogramarse de manera tan precisa, ¿por qué algunos animales (nosotros, por ejemplo) nos dedicamos a las chapuzas? ¿Por qué no están dotados, como la mayoría de los animales, para "hacerlo bien", excepto quizá después de experimentar los múltiples que resultan fallidos por desastrosos?

De acuerdo con la respuesta acostumbrada, tales animales evolucionaron en un ambiente complejo e impredecible donde las respuestas preprogramadas resultaban inapropiadas. Cuando el animal puede identificar individuos y vive entre otros que, a su vez, pueden identificarlo como una entidad diferenciada, el ambiente para cada uno de ellos se vuelve complejo. De ahí que se considere a menudo fuerza motriz de la evolución de la inteligencia la vida social de la mayoría de los animales que identifican individuos. En un contexto así, no puede ser más valiosa la capacidad de predecir las respuestas de los demás, principal característica del ambiente. Nos vimos, pues, obligados a considerar el ambiente social de los cuervos para averiguar por qué a ellos, más que a muchos otros animales, les debió de beneficiar convertirse en inteligentes.

El cuervo y su entorno natural

La historia natural de los cuervos sugiere que hubieron de evolucionar para habérselas con circunstancias en cambio incesante y a corto plazo. Hablamos de aves oportunistas; aunque cazan un poco, se han espe-

cializado en vivir de las presas de otros animales. Sin embargo, los depredadores que les abastecen resultan impredecibles y pueden también cazarlas a ellas. Un condicionamiento prolongado mediante ensayo y error parecería demasiado costoso, porque el primer error les costaría la vida; una reacción programada de arriba abajo ante un carnívoro impredecible no resultaría menos peligrosa.

La manera en que los cuervos compiten entre sí por la comida requiere habérselas con circunstancias mudables. Las parejas territoriales de cuervos intentan monopolizar la abundancia ocasional de comida. Por eso, los miembros de la numerosa población de juveniles y no reproductores establecen una contraestrategia: reclutar a compañeros de bandada para imponerse entre todos a los defensores del territorio. Sin embargo, ese mismo comportamiento que proporciona la comida al grupo, al tiempo que diluye el peligro entre un mayor número de individuos, intensifica la competencia por el recurso.

Los carnívoros proporcionan comida abundante, pero a menudo la consumen enseguida. A los cuervos que esperan les sale a cuenta participar pronto en el ciclo de alimentación, preferiblemente cerca de los carnívoros mientras éstos están todavía comiendo. Para ello, han de predecir el comportamiento del depredador: si puede atacar, y cuándo; a qué distancia puede saltar; cómo distraerlo. Han de disponer de parte de este conocimiento antes de que se relaje su atención mientras comen: entonces, los ensayos podrían serles fatales.

Las aves adquieren esa práctica con menos riesgos al principio de su vida. Los cuervos juveniles, cuando no están distraídos mientras comen, "comprueban" de forma rutinaria las reacciones de animales grandes, tales como lobos y otros carnívoros, por lo general posándose cerca y picoteándoles por atrás. Parece improbable que esta conducta responda a una táctica deliberada. Antes bien, parece tratarse de una suerte de "juego". En la bibliografía científica al respecto, el término "juego" designa un comportamiento carente de una función inmediatamente discernible, aunque sí encierra una función última; ésta no se persigue de modo consciente, pero resulta harto provechosa.

Los propios jovenzuelos reconocen el peligro de picotear a los carnívoros, tal es el miedo que reflejan cuando lo hacen. Deben, pues, de estar programados para dedicarse a dicha actividad porque el juego arriesgado coadyuva en último término a la supervivencia: les proporciona, cabe presumir, experiencia en la evaluación de lo que pueden sacar cerca de esos otros carnívoros. Con la provocación aprenden enseguida en qué animales pueden confiar y las distancias requeridas para moverse con seguridad. A la inversa, con su presencia casi constante alrededor de los carnívoros, éstos se acostumbran a su compañía, y poco a poco los van ignorando. Pero arreglárselas con los carnívoros peligrosos es sólo un medio para el fin buscado: acceder a un rico suministro de comida.

El poco tiempo que suele durar un recurso alimentario (por ejemplo, los cadáveres de ciervo se consumen en los bosques de Maine en uno o dos días) bonifica el transporte de la comida a otra parte, para ingerirla pasado un tiempo. Como otros córvidos, los cuervos esconden comida para su ingesta posterior. Extraen diligentemente un pedazo de carne tras otro de un cadáver disputado, los entierran y los camuflan con residuos para que pasen inadvertidos. E igual que muchos otros córvidos, los cuervos memorizan las localizaciones exactas de sus numerosos escondites; por lo general recuperan en horas o días lo que guardan. Mas, a diferencia de la mayoría de las aves que almacenan comida, los cuervos observan con atención dónde la ocultan sus competidores y memorizan la localización precisa no sólo de sus propios escondites, sino también de los que les han visto a otros.

Jugar con comida y esconderla

Conscientes de que jugar con los depredadores parece ayudar a los cuervos a valorar las situaciones y actuar en consecuencia, decidimos comprobar si el juego permitía en verdad a las aves jóvenes ajustar de un modo flexible su comportamiento. El hábito de esconder alimento ofrecía un campo prometedor para su estudio. Nos ofreció el entorno adecuado para los ensayos un extenso aviario que habíamos diseñado para simular las condiciones naturales de árboles y sotobosque.

De acuerdo con lo ya observado, comprobamos una vez más que los cuervos se evitaban unos a otros mientras escondían comida. Prefieren hacerlo en privado, o bloquear con árboles o rocas la visión de los demás. Los propietarios de escondrijos intentan ahuyentar a los ladrones potenciales. Y descubrimos que tales mañas para esconder alimento se originaban en respuestas innatas exhibidas en el juego, que provocan la reacción de sus protagonistas y que les permiten entonces aprender las reacciones apropiadas. Semejante proceso de ensayo y aprendizaje comienza entre los hermanos poco después de que abandonen el nido, empiecen a seguir a sus padres y aprendan a identificar insectos, frutos y otros bienes nutricionales de talla similar.

Los cuervos jóvenes, en el nido y cuando llevan pocos días fuera del mismo, manipulan todo tipo de objetos con el pico. Igual que el picotazo en la cola del lobo, se trata de juegos, pues tal conducta no proporciona ventajas inmediatas y requiere la inversión de tiempo y energía. Y arriesgarse. Los objetos en cuestión vienen a ser "juguetes".

En experimentos con una pollada de cuervos mansos, uno de nosotros hacía de padre y diariamente sacaba a pasear a los pájaros. Los juveniles se mantenían atareados picoteando ramitas, hojas, flores, piñas, guijarros, colillas, monedas y otros objetos que habíamos "sembrado" en el suelo. A los pocos días los jóvenes despreciaban ya los objetos incomestibles y buscaban ávidamente los comestibles. La manipulación juguetona de los objetos les aportaba la experiencia de aprender sobre el entorno. Puesto que a su edad los habrían alimentado todavía sus padres, podían permitirse ese comportamiento en apariencia inútil, cuyo beneficio sólo se manifestaría más tarde.

A la vez que las aves jóvenes aprenden a distinguir lo comestible de lo incomestible, aumentan y remozan su habilidad de esconder comida. Al principio, guardan indiscriminadamente algunos de los objetos que llaman más su atención. Andando el tiempo, los empujan al interior de grietas hasta que quedan en parte fuera de la vista; uno o dos meses después, todavía dependientes, re-



3. LOS CUERVOS MADUROS, que tienen una envergadura alar de 1,25 metros y pesan alrededor de 1,25 kilogramos, se acercan a un animal que los lobos acaban de cazar en el Parque Nacional de Yellowstone. El comportamiento juguetón de los cuervos jóvenes, según los autores, les enseña a habérselas con carnívoros mucho mayores, de los que dependen para buena parte de su comida.

JIM BRANDENBURG *Minden Pictures*

cubrirán los objetos escondidos con restos. Los cuervos jóvenes esconden de ordinario ante sus hermanos y padres, con los que viajan durante varios meses tras salir del nido; por eso, no es infrecuente que sean los hermanos los que recuperan los objetos que han guardado. Nos preguntamos si el juego de esconder los objetos incomestibles los ayuda a obtener la capacidad de predecir el comportamiento de los demás, de manera que más tarde puedan esconder y defender con éxito sus valiosos objetos comestibles.

Comprobar si la experiencia temprana afecta en último término al comportamiento de los adultos entraña un problema: la dificultad de controlar la experiencia que un ave determinada pueda tener. Sin embargo, advertimos que los cuervos también *nos* observaban y recuperaban "escondites" de comida que nosotros, sus padres y compañeros substitutos, les escondíamos. ¡Y podíamos controlar su comportamiento! Para un experimento designamos a una persona como "ladrón": siempre se llevaba los objetos ocultos que los jóvenes escondían, al parecer jugando. Una segunda persona examinaba continuamente los escondites de objetos de las aves, sin llevarse ninguno. En la prueba, proporcionamos a los cuervos, entonces ya más maduros, comida en vez de otros objetos. Esta vez las mismas dos personas, el ladrón y el no ladrón, se hallaban presentes y se limitaban a observar el comportamiento de los pájaros, sin intervenir.

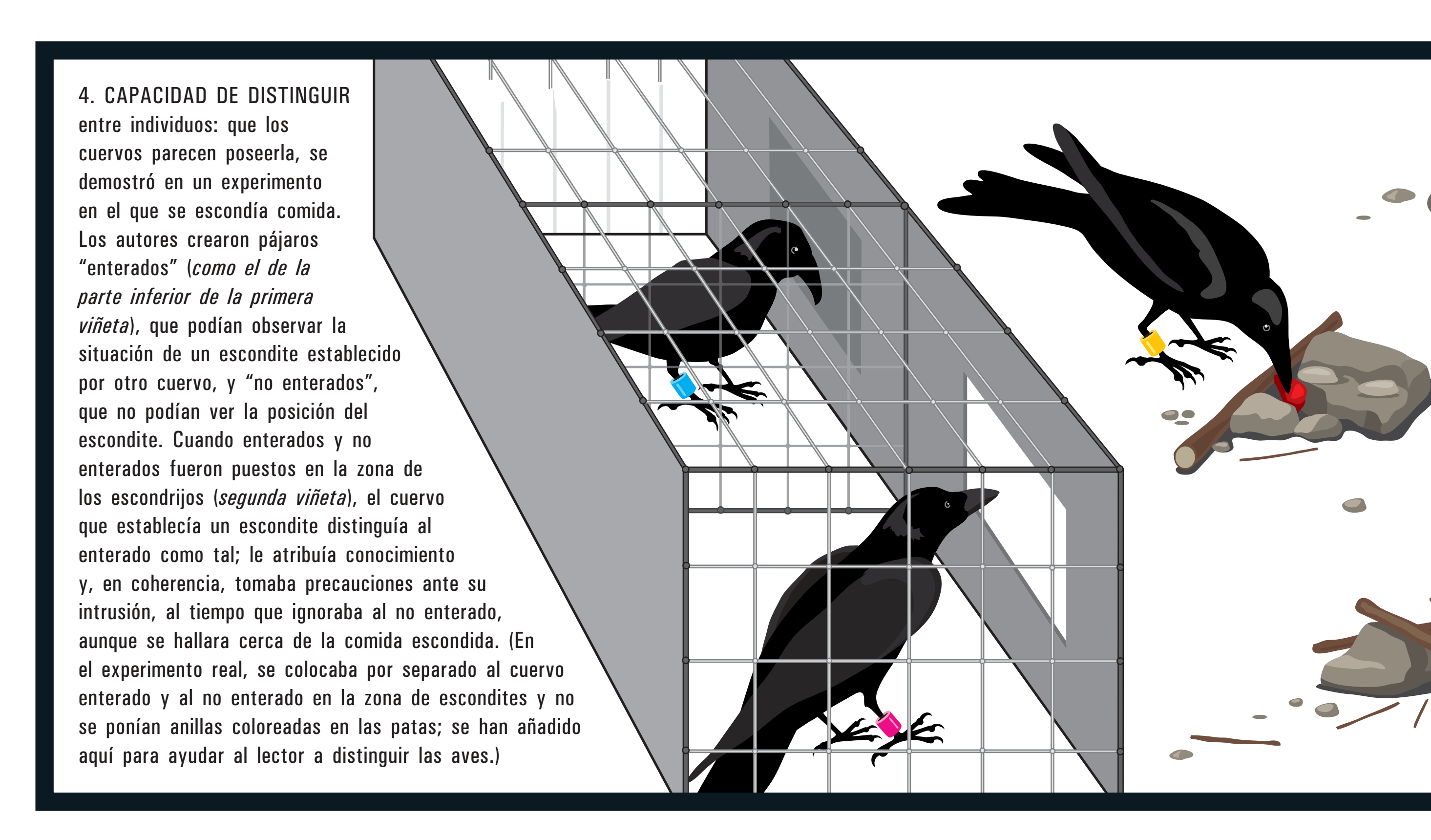
Situados en presencia del ladrón potencial, los cuervos retrasaban el momento en que guardaban su comida (como si esperasen un instante de distracción del ladrón); si el ladrón pasaba cerca, recuperaban la comida de esos escondrijos. En cambio, la persona benigna que no robaba objetos escondidos no les inducía a demorar el almacenamiento de comida; la ignoraban cuando se acercaba a los escondrijos. Con el experimento quedó demostrado no sólo que las aves mejoran su capacidad de esconder comida tras experimentar que otros irrumpen en sus escondrijos, sino que distinguen, además, entre los individuos (en este caso, seres humanos).

Discriminación de "enterados"

En la naturaleza los cuervos silvestres acostumbran comer en grupo. Pasan buena parte de su tiempo escondiendo lo sobrante para su aprovechamiento posterior. En esta situación, sería casi imposible para un pájaro ahuyentar a todo cuervo que por azar pasara cerca de cualquiera de sus docenas de escondites. Pero los cuervos adultos reducen mucho la posibilidad de que haya competidores que los vean preparar sus escondrijos o de tener que ahuyentar a posibles merodeadores: dispersan sus tesoros escondidos sobre una superficie de muchos kilómetros cuadrados.

En el marco de nuestro aviario resulta imposible que un individuo escape a los ojos escrutadores de los competidores. Una situación que nos permitió, en cambio, determinar por vía experimental si las aves se hallaban capacitadas para discriminar entre cuervos competidores, basándose en lo que éstos podían saber, del mismo modo que habían discriminado entre seres humanos.

En esta serie de pruebas nos apuntalábamos sobre un dato conocido, a saber, que los cuervos distinguen unos de otros entre miembros de su especie (como hacen con nosotros, aun siendo de otra especie). Creamos aves "enteradas" y "no enteradas"; las primeras habían observado la localización de los escondites de un cuervo determinado, mientras que las segundas no podían haber observado el emplazamiento de los escondites. Después emparejamos al cuervo que había guardado en escondrijos con



4. CAPACIDAD DE DISTINGUIR entre individuos: que los cuervos parecen poseerla, se demostró en un experimento en el que se escondía comida. Los autores crearon pájaros "enterados" (*como el de la parte inferior de la primera viñeta*), que podían observar la situación de un escondite establecido por otro cuervo, y "no enterados", que no podían ver la posición del escondite. Cuando enterados y no enterados fueron puestos en la zona de los escondrijos (*segunda viñeta*), el cuervo que establecía un escondite distinguía al enterado como tal; le atribuía conocimiento y, en coherencia, tomaba precauciones ante su intrusión, al tiempo que ignoraba al no enterado, aunque se hallara cerca de la comida escondida. (En el experimento real, se colocaba por separado al cuervo enterado y al no enterado en la zona de escondites y no se ponían anillas coloreadas en las patas; se han añadido aquí para ayudar al lector a distinguir las aves.)

JEN CHRISTIANSEN

estos competidores diferentes, tal y como habíamos procedido en los experimentos en que examinamos las respuestas de aves jóvenes a ladrones y no ladrones. Sin embargo, en este caso la disposición experimental exigió una modificación del aviario.

Un compartimiento grande del aviario servía como campo de escondrijos. Levantamos una pared opaca entre esa área y otra menor. En la pequeña abrimos una ventanilla de observación y colocamos un posadero ante ella, para que un pájaro se posase y mirara a través de una malla de alambre al cuervo que ocultaba comida en el compartimiento principal. Junto al compartimiento de observación, otro similar contenía un cuervo, si bien en este caso la ventana de observación quedaba velada por una cortina. De esta manera, dos cuervos tenían el mismo acceso auditivo a un pájaro que escondía comida, pero sólo uno de ellos contaba con acceso visual.

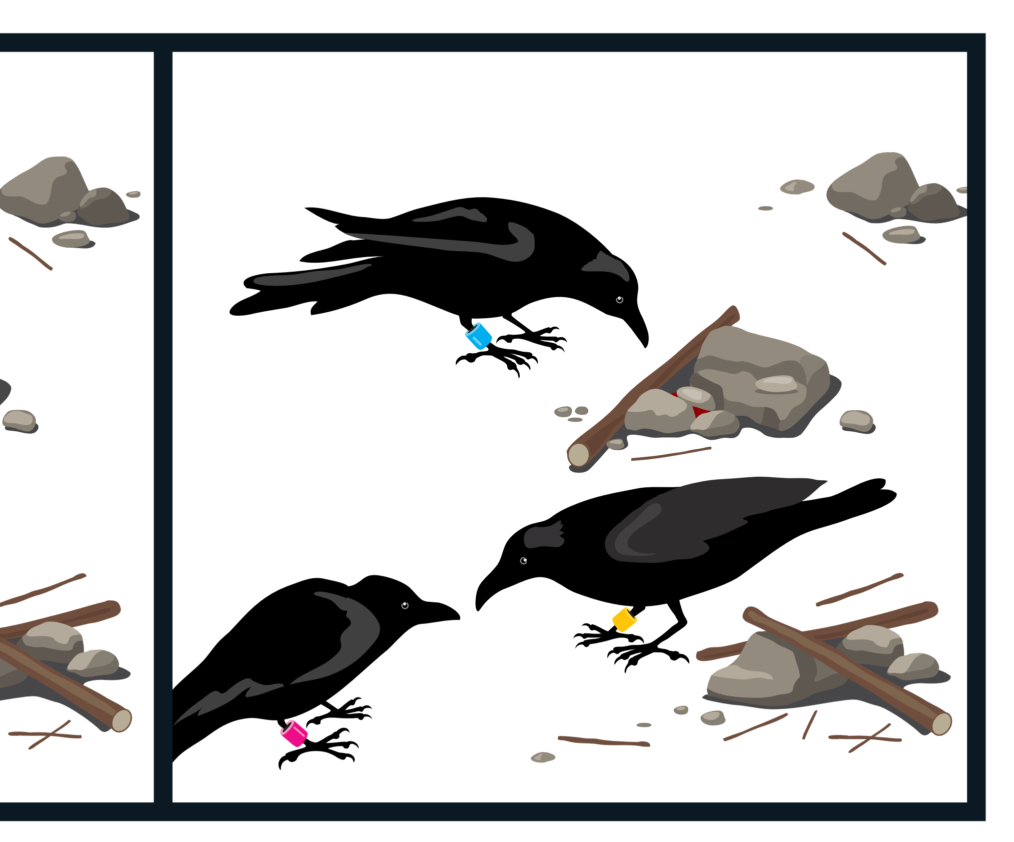
A los dos cuervos de los compartimientos pequeños se les permitía pronto (a los cinco minutos) acceder a la zona de escondrijos, en busca de comida. Tenían razones, por lo tanto, para observar al ocultador. En efecto, el pájaro "enterado" se posaba para intentar ver al ocultador; el no enterado, en el compartimiento con la cortina, intentaba levantar ésta para observar lo que pasaba al otro lado. (Descubrimos que teníamos que fijar la cortina para que no pudieran levantarla.) Después de que el cuervo ocultador hubiera escondido comida en tres puntos, lo sacábamos del compartimiento grande; cinco minutos después, lo dejábamos volver para que recuperara lo que había escondido. Se le permitía recuperarlo ya en privado, ya en presencia del enterado y del no enterado. (Ambos ladrones potenciales eran de un nivel jerárquico subordinado al del ocultador, para evitar que anularan sus respuestas defendiendo el botín.)

Los ocultadores recuperan su comida cuando el robo parece inminente. Los experimentos demostraron que extraían del escondite una parte bastante mayor cuando estaban emparejados con enterados que cuando lo estaban con no enterados o se los dejaba solos. Además, cuando un enterado se acercaba a dos metros de la comida camuflada, el ocultador lo ahuyentaba, mientras que ignoraba a los no enterados. Supusimos que los ocultadores recordaban qué cuervos los habían observado cada vez que escondían algo y después se prevenían de ellos, como si les atribuyeran conocimiento. Parecían anticipar las intenciones de los observadores y tomaban precauciones contra su esperable latrocinio.

Pero los enterados se precavían, a su vez, de la defensa de los ocultadores: en su presencia, no se dirigían directamente a los escondrijos; esperaban a que se hallasen a cierta distancia. Los resultados de estos experimentos dan a entender que atribuyen conocimiento a otros y anticipan su reacción.

En una versión modificada del mismo ensayo, nos propusimos descartar que los enterados hubieran proporcionado de manera inadvertida pistas sutiles que los defensores de los escondrijos pudieran leer. No se trataba, por tanto, de averiguar si los defensores del escondrijo sabían realmente que los enterados habían visto tales ocultamientos.

Con esa intención, pues, decidimos que fuera un humano, pasivo en todo lo demás, el que se encargara de esconder. Tal como predijimos a partir de los resultados de los primeros experimentos, los enterados, si estaban emparejados con otro enterado, se apresuraban a ratear en el escondite de los humanos. En cambio, cuando se los emparejaba con un competidor ignorante pero *dominador* (que ataca-



ría al merodeador para quedarse con el escondrijo), dilataban, unas 10 veces por término medio, el tiempo transcurrido antes de acercarse al escondrijo, a la espera de que el cuervo dominante estuviera lejos y ocupado.

Estos resultados no excluyen que los enterados suministren algunas pistas sutiles desconocidas que los merodeadores de escondrijos puedan usar, pero tal posibilidad es improbable. Los hallazgos apuntan con claridad a que los pájaros se libran a un comportamiento asombrosamente refinado que se basa en la capacidad de interpretar o de anticipar las acciones de los demás.

¿Qué piensan los cuervos?

El estudio de los estados mentales de los animales que no pueden informarnos de sus pensamientos está plagado de dificultades. De hecho, no sabemos y quizá nunca podremos saber qué pasa en la mente de otro animal, ni siquiera en la de otros individuos de nuestra propia especie. Pero invocando la navaja de Occam y aceptando la explicación más sencilla, tradicional en ciencia, podemos llegar a la conclusión de que nuestros experimentos establecen de manera sólida que los cuervos se valen de algún tipo de representación mental para guiar sus acciones. Los resultados de los experimentos de izar el cordel indican el uso de la lógica. Y las tácticas del ladrón y del antiladrón sugieren que los cuervos juzgan a sus competidores por lo que recuerdan sobre el objeto de su atención. Atribuyen a los competidores la capacidad de saber, y a partir de esa atribución, y de la jerarquía de dominancia, elaboran decisiones estratégicas para ocultar la comida y recuperarla.

Hay aprendizaje. Mas, por sí solo, no puede explicar el comportamiento observado en su integridad, que se exhibe muy deprisa, casi de inmediato, sin ensayos ni errores. Conjeturamos que las aves parten de un comportamiento lúdico preprogramado, que genera las experiencias imprescindibles para el aprendizaje. Luego, el aprendizaje puede traducirse en conocimiento consciente (es decir, una capacidad de usar la lógica), que será útil en el contexto, muy impredecible, de un entorno social con competidores y depredadores, y que podrá transferirse a cualquier contexto nuevo, como el de obtener comida izando un cordel.

Ignoramos hasta qué punto esa facultad de los cuervos es insólita entre los animales (descartados los humanos). Pero sospechamos que, aunque no rara, sí se trata de una facultad restringida a tareas específicas, porque los instintos subyacentes y las tendencias de aprendizaje cortados a la medida del ambiente de los animales varían mucho. En el cuervo, sin embargo, puede que sea más general que en la mayoría de los animales. Así lo creemos porque no conocemos ninguna otra ave que sea tan juguetona y, por ende, se exponga a semejante variedad de contingencias. Quizá por ello sea el pájaro más ampliamente distribuido, de forma natural, en el mundo, donde habita los mismos continentes que el hombre y se encuentra en casi cualquier hábitat que ocupe nuestra especie.

Los autores

Bernd Heinrich y **Thomas Bugnyar** investigaron juntos a los cuervos cuando Bugnyar remataba su formación académica en la Universidad de Vermont, donde Heinrich enseña biología desde 1980. Bugnyar se doctoró en la Universidad de Viena con una tesis sobre cuervos realizada en la Estación de Investigación Konrad Lorenz, de Grünau. En la actualidad es profesor en la facultad de psicología de la Universidad escocesa de St. Andrews.

Bibliografía complementaria

RAVENS, *CORVUS CORAX*, DIFFERENTIATE BETWEEN KNOWLEDGEABLE AND IGNORANT COMPETITORS. Thomas Bugnyar y Bernd Heinrich en *Proceedings of the Royal Society London*, serie B, vol. 272, n.º 1573, págs. 1641-1646; 22 agosto, 2005.

TESTING PROBLEM SOLVING IN RAVENS: STRING-PULLING TO REACH FOOD. Bernd Heinrich y Thomas Bugnyar en *Ethology*, vol. 111, n.º 10, págs. 962-976; octubre, 2005.

PILFERING RAVENS, *CORVUS CORAX*, ADJUST THEIR BEHAVIOUR TO SOCIAL CONTEXT AND IDENTITY OF COMPETITORS. Thomas Bugnyar y Bernd Heinrich en *Animal Cognition*, vol. 9, n.º 4, págs. 369-376; octubre, 2006.



Procesamiento visual de la información

La retina procesa mucha más información de la que habíamos imaginado. Elabora una docena de vídeos que envía luego al cerebro

Frank Werblin y Botond Roska

Nuestras asombrosas facultades visuales nos parecen tan obvias, que pocos nos hemos parado a pensar en la forma en que vemos. Durante decenios, nuestro sistema de procesamiento visual se ha venido asimilando a una suerte de cámara de televisión: el cristalino enfoca la luz que recibe sobre una matriz de fotorreceptores alojados en la retina. Por arte de magia, esos detectores de luz convierten los fotones incidentes en señales eléctricas que se envían por el nervio óptico al cerebro, donde se procesan.

Sin embargo, experimentos recientes indican que el símil resulta inadecuado. En realidad, la retina efectúa en el seno del ojo un importante procesamiento previo de la información visual; luego, envía al cerebro una serie de representaciones parciales de la escena que observamos, para que se interpreten.

Esta sorprendente conclusión se desprende del estudio de la retina del conejo, que guarda una semejanza notable con la versión humana. (Otros trabajos nuestros con salamandras han cosechado resultados similares.) La retina puede considerarse una diminuta excrecencia de materia cerebral, llevada a la periferia para obtener un acceso más directo al mundo exterior. ¿De qué modo construye la retina las representaciones que envía? ¿Qué "aspecto" tienen cuando llegan a los centros visuales del cerebro? ¿Cómo transmiten la inmensa riqueza y variedad del mundo real? ¿Confieren significado, de forma que ayudan al cerebro a analizar la escena? He aquí una pequeña muestra de las cuestiones que esos trabajos empiezan a responder.

A grandes rasgos, hemos hallado que unas células nerviosas especializadas (neuronas) que se alojan en lo profundo de la retina proyectan lo que se podría comparar a una docena de pistas videográficas, doce abstracciones del mundo visual. Cada pista contiene una representación rudimentaria de un aspecto de la escena, que la retina actualiza y envía al cerebro sin cesar. Una de las pistas transmite un esbozo a trazos de la imagen, en el que se detallan sólo los bordes de los objetos. Otra responde al movimiento, a menudo en una dirección concreta. Las hay que portan información sobre las sombras y las luces. Las representaciones de otras pistas no se han clasificado todavía.

Cada pista es transmitida por su propia población de fibras del nervio óptico hasta los centros visuales superiores del cerebro, donde tiene lugar un procesamiento más elaborado. [El sistema auditivo humano cuenta con una arquitectura similar: cada nervio auditivo porta información concerniente a una gama tonal limitada, que el cerebro combina e integra posteriormente.] Las investigaciones sobre la corteza visual han demostrado que las distintas propiedades de la imagen (movimiento, color, profundidad, forma) se procesan en diversas regiones del cerebro; una lesión en una región concreta provoca un déficit en la percepción de una propiedad determinada. Pero la capacidad del cerebro para llegar siquiera a sentir tales pro-

JEAN FRANCOIS PODEVIN

piedades tiene ya su origen en los vídeos que prepara la retina.

Los diagramas de las páginas siguientes tratan de explicar la forma en que la retina crea las surrealistas imágenes eléctricas que informan al cerebro. Nuestras investigaciones prosiguen. Creemos poder arrojar algo de luz sobre el proceso de construcción de cada uno de esos vídeos, pero no estamos en condiciones de ofrecer un modelo completo. Aunque esos 12 vídeos portan toda la información que el cerebro recibe para interpretar el mundo visual, no podemos explicar todavía el modo en que se integran sus contenidos. Pudiera ser que sirvieran de meros indicios o pistas elementales, una suerte de andamiaje sobre el cual monta el cerebro sus constructos. Esa noción no es muy dispar del llamado "ojo mental" (facultad de imaginar), que entreteje las palabras de una novela y las trueca en una narración significativa.

A pesar de que las representaciones retinianas captan plenamente los datos visuales de una escena —sea una mesa servida, un paisaje o un rostro parlante—, da la impresión de que faltan componentes esenciales. No hay indicios de referencias al sentimiento, la actitud, la textura o el enfoque de la escena. Es posible que esos rasgos sean inherentes a las pistas de vídeo que interpreta el cerebro, pero no sabemos cómo. O tal vez, por centrarnos en la retina del conejo, no alcancemos a encontrar todas las representaciones que captaría la retina humana: representaciones "de alta resolución" que podrían extraer el "sentimiento" y otras cualidades, de formas que todavía están por develar.

No obstante, sí está claro que las representaciones de la retina constituyen un lenguaje visual natural. La comprensión de tal lenguaje reviste hoy una importancia especial. Varios grupos de investigación buscan devolver la vista a los ciegos mediante la introducción de un sensor artificial justo delante del nervio óptico, un sensor que haría las veces de retina. Aunque se ha avanzado, los resultados siguen siendo bastante burdos, con transmisiones que se limitan a versiones vagas de patrones básicos. Se están llevando a cabo ensayos en humanos en el Instituto Ocular Doheny de la Universidad de California del Sur; pronto comenzarán en la facultad de medicina de la Universidad estatal Wayne.

El objetivo final de esos ensayos seguramente se encuentre lejos todavía; su éxito dependerá de la capacidad de proporcionar al cerebro pautas de actividad similares a las que normalmente le suministra la retina, mediante el uso del lenguaje natural de la visión. El próximo reto: "conectar" cada abstracción con las fibras adecuadas del nervio óptico.

El desarrollo de dispositivos protésticos exige una comprensión detallada del lenguaje natural de la visión, que toma forma en la retina. Esta comprensión, por otra parte, arrojará luz sobre la forma en que el ojo y el cerebro, en conjunción, ven con claridad, son engañados por ilusiones ópticas, siguen el rastro de objetos en movimiento rápido y rellenan los vacíos inherentes a las imágenes de televisión, ordenador o películas de cine. Confiamos en que nuestra descripción del procesamiento previo que efectúa la retina constituya un paso encaminado a tal fin.

Resumen/*Visión surrealista*

- La retina no se limita a trasladar al cerebro señales simples. De una escena visual, extrae una docena de representaciones distintas: vídeos refinados y fantasmagóricos que elaboran un número reducido de neuronas.
- El cerebro se vale de esas abstracciones para construir un mundo visual de nítidos detalles y rico en significado.
- La comprensión del "lenguaje visual" que esas películas portan facilitará la construcción de sensores que ayuden a ver a los ciegos. También arrojará luz sobre el modo en que ven el ojo y el cerebro, así como las formas en que éstos pueden ser engañados.

Anatomía activa

La sorprendente actuación de la retina es fruto de la complejidad de su arquitectura. Experimentos llevados a cabo por numerosos especialistas han aportado detalles fisiológicos al modelo clásico de circuitería retiniana que delineó Santiago Ramón y Cajal hace un siglo y vienen repitiendo los libros de texto desde entonces.

La retina ❶, transparente, consta de una serie de estratos neuronales perfectamente organizados ❷. El estrato externo, que se halla diametralmente opuesto al cristalino, contiene los conos y los bastones, células que absorben la luz incidente y la convierten en actividad neuronal. Esos fotorreceptores están conectados a neuronas de 10 tipos, las células bipolares; de ellas emanan largos brazos portadores de señales (axones) que llegan hasta un estrato central, la capa "plexiforme interna". Esa franja ofrece el aspecto de una serie de 10 estratos paralelos. El axón de cada tipo de célula bipolar entrega señales tan sólo a unos pocos de los estratos.

En el lado más interno de la capa plexiforme ❸ se alojan 12 tipos de células ganglionares (*morado*). La mayoría de esos tipos envían sus dendritas a un estrato específico, en el que reciben señales excitadoras procedentes de un número limitado de neuronas bipolares (*verde*). Las señales eferentes de las células ganglionares corresponden a los flujos de vídeo, que el nervio óptico lleva hasta diferentes regiones cerebrales para su interpretación. Algunas dendritas ganglionares se ramifican ampliamente, llevando información difusa. Otras se ramifican en forma más estrecha; portan información de alta resolución. Algunas responden al incremento de la tasa de liberación de neurotransmisores por las células bipolares, mientras que otras lo hacen a las variaciones decrecientes de dicha tasa.

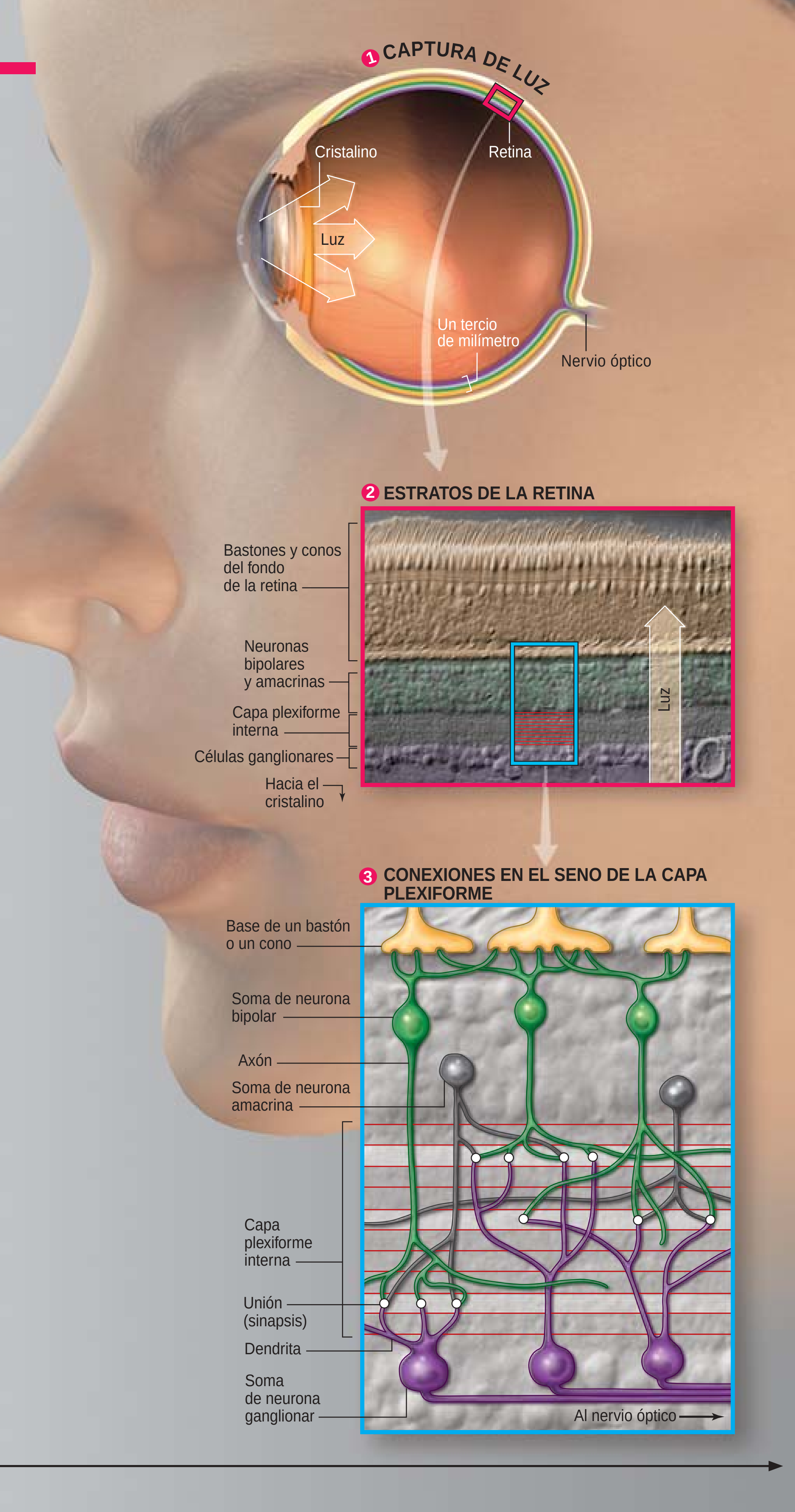
No obstante, las señales que envían las células bipolares a las células ganglionares que residen en cada uno de los estratos no bastan para crear la docena de "vídeos". Las señales que emiten las células bipolares son moduladas por ciertas neuronas pe-

queñas, las células amacrinas (*gris*). Algunas de esas células operan en sentido lateral, dentro de un mismo estrato, de forma que inhiben la comunicación entre células ganglionares alejadas de esa capa. Otras neuronas amacrinas inhiben verticalmente las señales entre estratos —y, por tanto, entre vídeos— como si instruyeran a cada estrato para que no registre lo que registra otro. De ese modo, las células amacrinas seleccionan y emiten señales para coordinar las pistas de vídeo.

Heinz Wassle, del Instituto Max Planck de Investigación del Cerebro en Frankfurt, Thomas Euler, del Instituto Max Planck de Investigación Médica en Heidelberg, y Richard Masland, del Hospital General de Massachusetts, han identificado al menos 27 tipos de células amacrinas (así como los 10 tipos bipolares y los 12 tipos ganglionares).

Todo cuanto vemos en el espacio lo observamos mientras el tiempo avanza. Incluso el registro de un grueso punto negro inmóvil, fijo en un espacio tridimensional incoloro, constituye una película, pues la retina lo ve de forma continua mientras transcurre el tiempo. Son muchas las células de cada tipo ganglionar que pueblan la retina; el conjunto de las de cada tipo aporta un vídeo distinto. Pero, a diferencia de las películas de celuloide, que constan de fotogramas individuales, las que generan los ganglios constituyen flujos continuos de señales.

Las interacciones entre las células bipolares y las células amacrinas, que son "leídas" de forma simultánea por cada conjunto de neuronas ganglionares, constituyen el total de los datos que recibimos para interpretar el mundo visual. Al leer, asir objetos, reconocer rostros o desplazarnos de un lado a otro, las únicas indicaciones visuales que recibe el cerebro son las diversas combinaciones de esas películas. Constituyen un "lenguaje visual" fundamental, dotado de una fraseología y una gramática peculiares, que representa el vocabulario neuronal del sentido de la vista.



DON FOLEY (cabeza); STEPHEN C. MASSEY *Escuela de Medicina de la Universidad de Texas en Houston* (*micrografía coloreada*); JEN CHRISTIANSEN (*diagrama plexiforme*)

Los vídeos de un destello

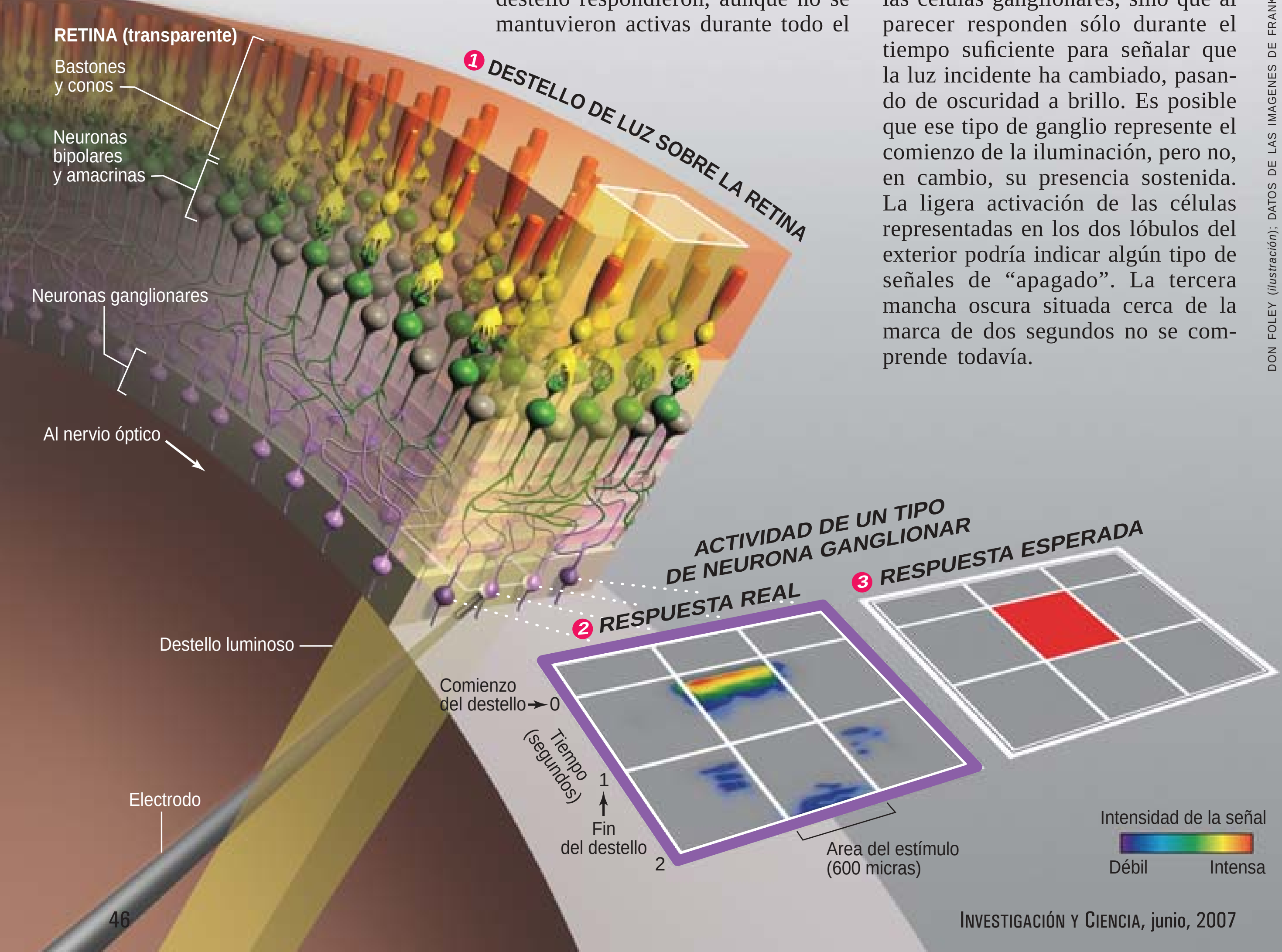
Esta descripción de la actividad retiniana se funda en experimentos propios. Registramos lo que ocurre en células ganglionares individuales mediante una aguja de vidrio, hueca y diminuta. A través de esa micropipeta se inyecta un contraste amarillo que se difunde rápidamente por todas las dendritas de una célula ganglionar; ello permite ver a qué estratos alcanzan. La micropipeta sirve también de electrodo, pues mide la actividad eléctrica de la célula, que es reflejo de la combinación de señales excitadoras llegadas desde las células bipolares y de las señales inhibidoras procedentes de las células amacrinas.

Con el fin de familiarizarnos con los flujos de datos que las células ganglionares envían al nervio óptico, empezamos por experimentos sencillos. Se trataba de registrar de qué modo se representaba, en una batería lineal de células ganglionares, un destello luminoso de forma cuadrada, proyectado directamente sobre la retina de un conejo **1**. El destello se mantuvo durante un segundo, confinado en un cuadrado de 600 micrometros de lado. Por tanto, el destello se proyectó sobre una región reducida y bien definida de la retina, durante un lapso de tiempo determinado.

Registramos las señales de excitación e inhibición que recibía un tipo de célula ganglionar durante ese período. Repetimos el proceso para cada uno de la docena de tipos. Cada tipo mostraba una respuesta peculiar; la gama de respuestas alcanzó una diversidad notable. En la representación gráfica **2**, una casilla corresponde a un segundo; el color indica la magnitud de la señal que se produce en un tipo de célula.

Importa señalar que, para el tipo de neurona ganglionar ilustrado aquí, las células situadas en el ancho del destello respondieron, aunque no se mantuvieron activas durante todo el tiempo que estuvo brillando la luz. Y, curiosamente, algunas de las situadas fuera de la casilla de 600 micrometros se activaron, una vez concluido el destello; ese comportamiento se ve reflejado en el gráfico mediante dos lóbulos (*azul*), que aparecen después del intervalo de un segundo. Una tercera región, en el seno de la iluminada, se activó ligeramente, cerca ya de la marca de dos segundos.

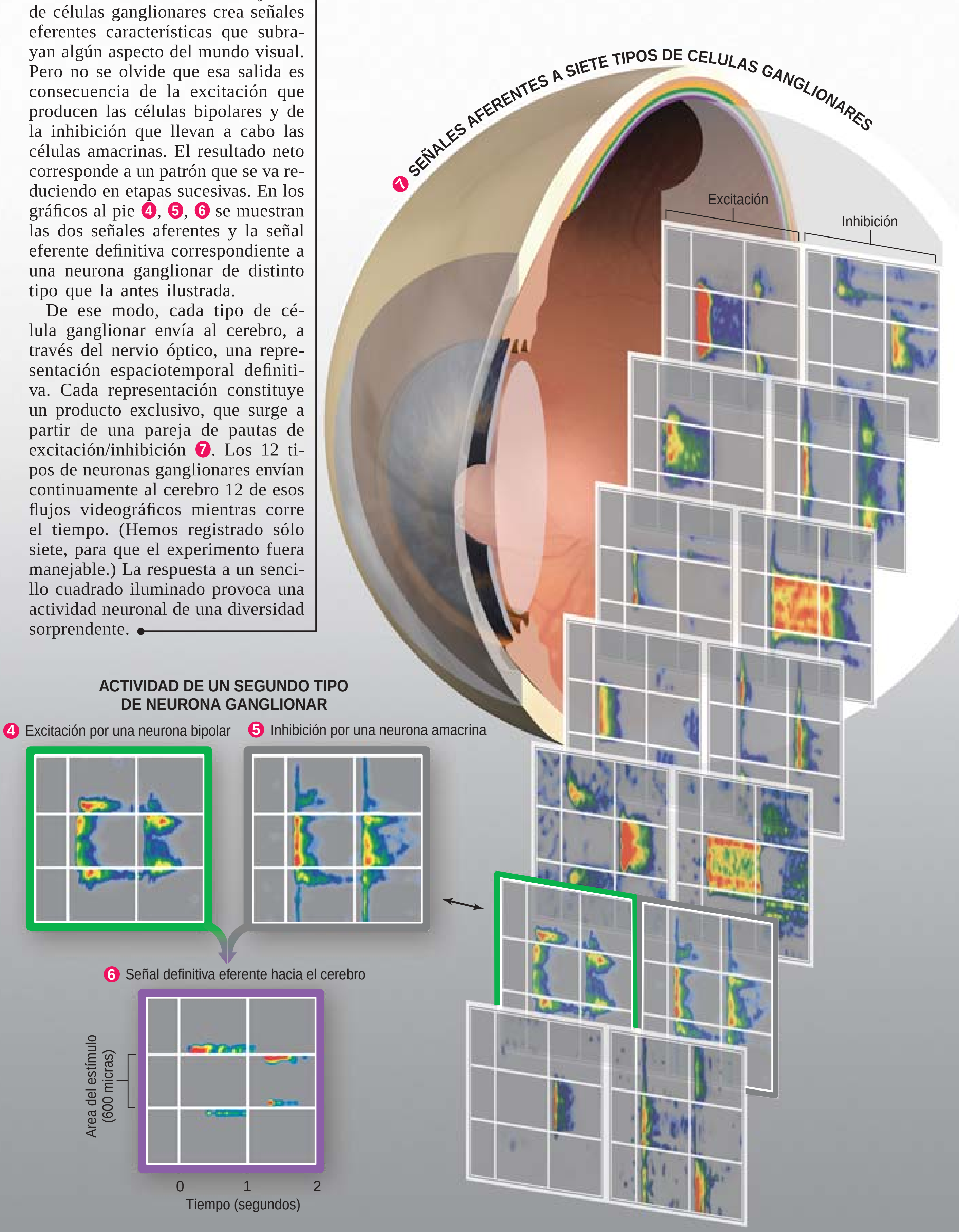
¿Cómo debe interpretarse esa pauta de activación? Si todas las células estuvieran enviando señales eferentes durante el segundo entero, aparecería una señal de "encendido" durante todo el segundo, que llenaría la casilla correspondiente en nuestra cuadrícula **3**. En realidad, la salida llega filtrada: presenta toda la anchura del destello, pero aparece truncada en el tiempo (con una duración de tal vez una décima de segundo); asimismo, comienza aproximadamente una décima de segundo después de hacerlo el destello. No sólo se produce una pequeña demora en la respuesta de las células ganglionares, sino que al parecer responden sólo durante el tiempo suficiente para señalar que la luz incidente ha cambiado, pasando de oscuridad a brillo. Es posible que ese tipo de ganglio represente el comienzo de la iluminación, pero no, en cambio, su presencia sostenida. La ligera activación de las células representadas en los dos lóbulos del exterior podría indicar algún tipo de señales de "apagado". La tercera mancha oscura situada cerca de la marca de dos segundos no se comprende todavía.



DON FOLEY (*ilustración*); DATOS DE LAS IMAGENES DE FRANK WERBLIN

Cada uno de los doce conjuntos de células ganglionares crea señales eferentes características que subrayan algún aspecto del mundo visual. Pero no se olvide que esa salida es consecuencia de la excitación que producen las células bipolares y de la inhibición que llevan a cabo las células amacrinas. El resultado neto corresponde a un patrón que se va reduciendo en etapas sucesivas. En los gráficos al pie 4, 5, 6 se muestran las dos señales aferentes y la señal eferente definitiva correspondiente a una neurona ganglionar de distinto tipo que la antes ilustrada.

De ese modo, cada tipo de célula ganglionar envía al cerebro, a través del nervio óptico, una representación espaciotemporal definitiva. Cada representación constituye un producto exclusivo, que surge a partir de una pareja de pautas de excitación/inhibición 7. Los 12 tipos de neuronas ganglionares envían continuamente al cerebro 12 de esos flujos videográficos mientras corre el tiempo. (Hemos registrado sólo siete, para que el experimento fuera manejable.) La respuesta a un sencillo cuadrado iluminado provoca una actividad neuronal de una diversidad sorprendente.

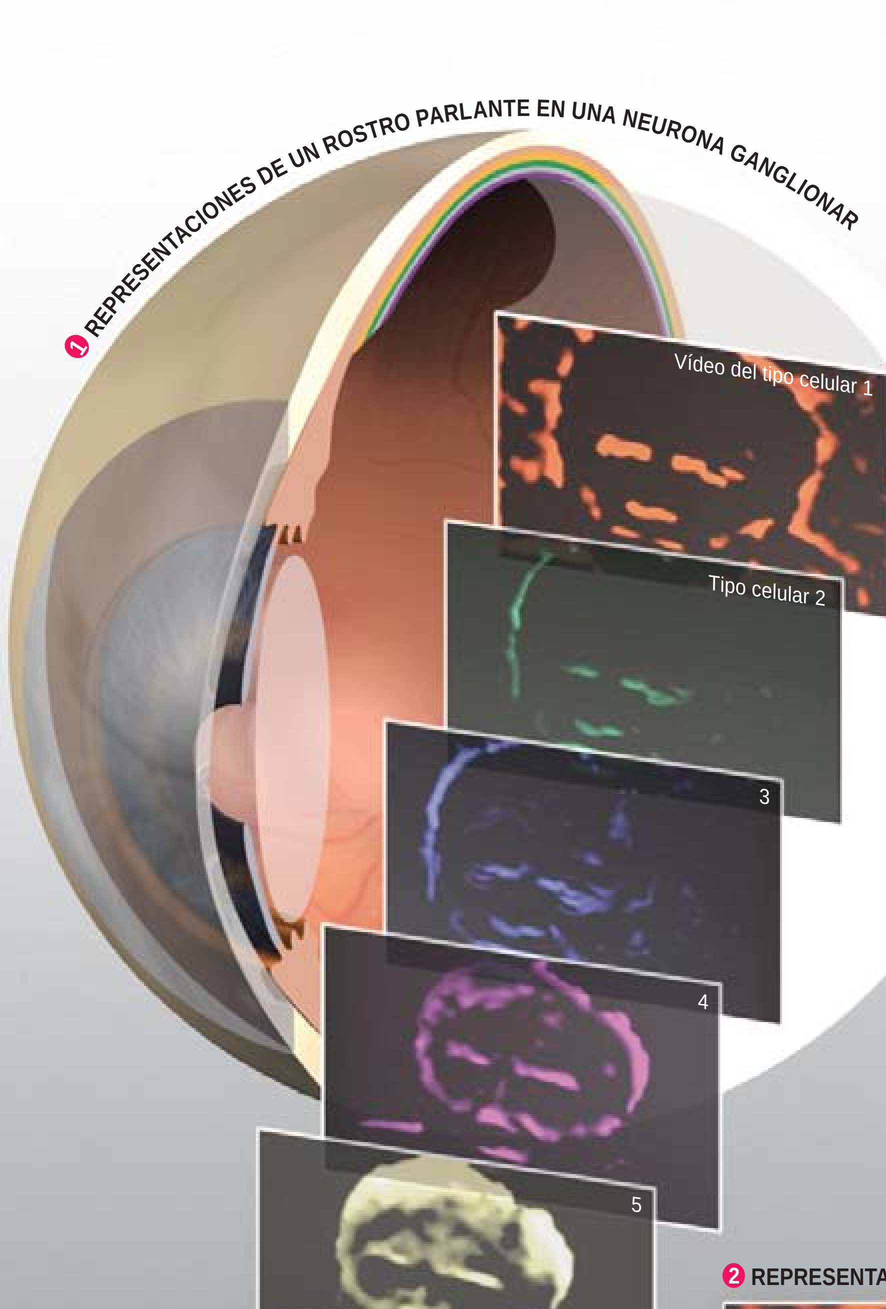


Filtrado de un rostro

Nos proponemos averiguar de qué modo extrae significado del mundo visual cada conjunto de células ganglionares. Dado que la retina está diseñada para manejar información de mayor interés que un mero destello de luz, nos hemos preguntado qué ocurriría cuando la retina contemplase una escena natural, como una persona que habla. ¿Qué nos mostraría cada una de las 12 representaciones? ¿Habría algún rasgo extraído por uno de los vídeos y dejado de lado por los demás?

Aunque puede dar la impresión de que la captura del procesamiento de un cuadrado de luz constituye una tarea sencilla, la realidad es que el implante, en la retina de un conejo vivo, del número de electrodos suficiente para estudiar un sencillo destello de un segundo de duración entraña una gran complejidad técnica. ¿Cuánto más no lo será, entonces, el estudio de una escena natural que dure todo un minuto?

En lo que a ese segundo ejercicio respecta, programamos los datos tomados del experimento del destello en un ordenador para simular un famoso microcircuito que actúa de retina artificial: la CNN (de “Cellular Neural Network”, Red neuronal celular). Esa retina artificial fue desarrollada por Leon Chua, de la Universidad de California en Berkeley, y Tamás Roska, de la Academia Húngara de Ciencias en Budapest [*Tamás es padre de Botond Roska, uno de los autores del artículo*]. El



2 REPRESENTACIONES COMBINADAS QUE SE ENVIAN AL CEREBRO





DON FOLEY (*ilustración*); DATOS DE LAS IMAGENES DE FRANK WERBLIN

sistema transformó el destello cuadrado en una docena de configuraciones espaciotemporales de excitación/inhibición, que guardaban una estrecha semejanza con las configuraciones que genera la retina viva.

Alentados por ese resultado, le presentamos a la simulación del chip retiniano una escena natural. Uno de los autores (Werblin) se situó frente a una cámara y estuvo hablando durante poco más de un minuto. El simulador, programado para ese ejercicio por David Balya, de la Universidad de Tecnología y Economía de Budapest, generó los vídeos de las representaciones generadas por siete de los doce tipos de neuronas ganglionares ❶.

Al objeto de confirmar que la simulación del chip era certera, medimos las reacciones de varias neuronas de la retina del conejo vivo al mostrarle el rostro parlante. No tardó en evidenciarse que cada población de neuronas ganglionares operaba como un filtro: extraía una representación espaciotemporal del mundo, que se enviaba al cerebro en forma de película. Le impusimos un color a cada una de las representaciones generadas por el ordenador para distinguirlas mejor.

Uno de los filtros (*página izquierda, naranja*) parecía extraer sólo los bordes de los rasgos del rostro móvil, por lo que la representación que ofrecía del mundo venía a ser la de un boceto perfilado. Otro (*morado*) acentuaba las sombras bajo los ojos y la nariz. Un tercer filtro (*beige*) resaltaba las luces, en vez de sombras o bordes.

Por supuesto, nuestras conclusiones concernientes a la información que recaba cada uno de los 12 filtros podría no ser correcta. Desdichadamente, resulta imposible representar con precisión sobre papel impreso las configuraciones y regularidades que hemos registrado, dado que corren de forma continua, como películas de cine; con todo, cabe señalar que contienen numerosos intervalos "en blanco". Cada vídeo entra bruscamente en actividad sólo durante unas cuantas milésimas de segundo cada vez; el resto del tiempo, permanece oscuro. No obstante, nuestro método sí muestra que cada filtro responde a una cualidad concreta del aspecto físico y el movimiento del rostro; cada tipo de célula ganglionar tiene su forma peculiar y única de representar el mundo.

Mediante la coloración de las representaciones hemos seguido el rastro a las contribuciones de cada conjunto de células ganglionares hasta la representación final, combinada, que se produce mediante la superposición de los filmes. Hemos combinado los siete flujos en un solo vídeo "maestro". Cuatro fotogramas correspondientes a momentos distintos de la disertación de Werblin ❷ nos dan idea de los cambios de expresión de su rostro al mover los labios; la aparición y desaparición de ciertas representaciones le confieren un aspecto fantasmal. Eso es lo que produce la retina. Lo que recibe el cerebro.

Nuestros vídeos no constituyen más que aproximaciones. Con todo, evidencian que el tejido neuronal que recubre el fondo del ojo, no más grueso que una hoja de papel, muestrea y descompone el mundo visual en una docena de componentes discretos. Esos componentes viajan, intactos y por separado, hasta regiones cerebrales distintas, conscientes unas, otras no. El desafío que afronta ahora la neurociencia es comprender de qué forma interpreta el cerebro esos paquetes de información y genera una visión de la realidad, grandiosa y sin discontinuidades.

Los autores

Frank Werblin y **Botond Roska** descubrieron buena parte de la circuitería funcional de la retina a principios de los noventa del siglo pasado en la Universidad de California en Berkeley. Werblin continúa allí como profesor de neurociencias. Roska dirige un grupo de investigación en el Instituto Friedrich Miesler de Investigación Biomédica de Basilea. Desarrolla técnicas genéticas para la identificación de sendas visuales.

Bibliografía complementaria

DIRECTIONAL SELECTIVITY IS FORMED AT MULTIPLE LEVELS BY LATERALLY OFFSET INHIBITION IN THE RABBIT RETINA. Shelley I. Fried, Thomas A. Münch y Frank S. Werblin en *Neuron*, vol. 46, n.º 1, págs. 117-127; 2005.

PARALLEL PROCESSING IN RETINAL GANGLION CELLS: HOW INTEGRATION OF SPACE-TIME PATTERNS OF EXCITATION AND INHIBITION FORM THE SPIKING OUTPUT. Botond Roska, Alyosha Molnar y Frank S. Werblin en *Journal of Neurophysiology*, vol. 95, págs. 3810-3822; 2006.



2 segundos



3 segundos



4 segundos

Vórtices en superconductores

En la mayoría de los superconductores, la aplicación de un campo magnético produce remolinos de supercorrientes. Al moverse por el material, estos vórtices generan nuevos efectos de interés, tanto para la ciencia básica como para la aplicada

María Pilar González, Javier Villegas, Elvira María González y José Luis Vicent

Vórtice es sinónimo de remolino, torbellino. Entre las primeras acepciones de remolino encontramos: movimiento giratorio y rápido del aire, el agua, el polvo, el humo, etcétera. Dentro de ese "etcétera" incluiremos aquí unas estructuras muy peculiares que aparecen en cierto tipo de superconductores y cuya explicación, dada en 1957, le valió en 2003 el premio Nobel de física a Alexei A. Abrikosov.

Cada vez que abrimos un grifo y dejamos escapar el agua por el desagüe vemos un vórtice. Menos cotidiano es el vórtice producido por un tornado. De estos dos ejemplos podemos concluir que los vórtices se nos ofrecen en fenómenos físicos muy diversos, con orígenes y tamaños dispares. Nos ceñiremos en este artículo a vórtices microscópicos asociados a fenómenos de tipo cuántico en distintos tipos de materia, por ejemplo en líquidos cuánticos (el helio) y en algunos sólidos a bajas temperaturas. En concreto, nos vamos a limitar a analizar determinados aspectos de los vórtices que aparecen en los superconductores de baja temperatura. Quedan fuera de este artículo las propiedades específicas de los vórtices de los superconductores de alta temperatura. En estos materiales, las temperaturas superconductoras, hasta de 100 kelvin (–173 ºC), son lo bastante altas para que los vórtices se comporten como materia blanda, en la que las fluctuaciones térmicas desempeñan un papel preponderante. No es éste el caso de los vórtices que abordaremos.

Superconductividad: un fenómeno cuántico a escala macroscópica

En 1911 Kamerlingh Onnes y sus colaboradores descubrieron que el mercurio a 4,2 kelvin (–268,8 ºC) conduce la electricidad sin disipación, es decir, con resistencia cero. Este fenómeno, explicado por la teoría microscópica de la superconductividad de Bardeen, Cooper y Schrieffer (así llamada en honor de sus creadores John Bardeen, Leon N. Cooper y John R. Schrieffer,



NASA

1. VORTICE GIGANTE: un huracán en el Caribe. Vórtices nanométricos de electrones que giran alrededor de tubos de líneas de campo magnético explican las propiedades de la clase más amplia de materiales superconductores.

por la que se les concedió el Nobel de física en 1972), se acompaña de un comportamiento magnético muy especial.

En principio, la superconductividad es una transición de fase. Por calentamiento suficiente del material, por aplicación de un campo magnético externo de intensidad adecuada o por el paso de una densidad de corriente eléctrica mayor que determinado valor, el superconductor transita al estado normal, donde conduce con resistencia. Hoy, el número de aleaciones, compuestos y elementos que tienen propiedades superconductoras es enorme. Diríase que ahora la pregunta correcta sería inquirir por qué un material no superconduce. La superconductividad es un efecto más extendido de lo que en principio pudiera pensarse.

El estado superconductor no consiste sólo en la resistencia nula. La respuesta de un superconductor a los campos magnéticos externos se desvía de lo habitual. Un campo magnético externo aplicado a un material en estado ordinario penetra completa y uniformemente en él; no ocurre así en estado superconductor. La aplicación de un campo magnético externo produce uno de estos dos efectos: o bien el campo tiene intensidad suficiente para promover la transición de fase, destruir la superconductividad y penetrar en el material, o bien el superconductor se protege del campo aplicado y automáticamente aparecen corrientes superconductoras internas que apantallan el campo externo y le impiden entrar en el material. Esta segunda situación recibe el nombre de estado Meissner, en honor a su descubridor. Desarrollan de manera estricta ese comportamiento los superconductores de tipo I.

En cambio, en los superconductores de tipo II se da una situación nueva, intermedia entre el estado Meissner y el normal. Se trata del estado mixto, también llamado de vórtices o de Abrikosov. Los superconductores de tipo II abundan en la naturaleza. Todas las aleaciones y compuestos, así como los elementos niobio (Nb) y vanadio (V), son de tipo II.

Cuando el campo magnético aplicado tiene un valor intermedio entre los valores para los que se produce la expulsión completa del campo magnético del interior del superconduc-

tor y los valores donde el material transita al estado normal, el superconductor de tipo II se encuentra en un estado mixto; en él coexisten zonas en estado superconductor y zonas en estado normal. La secuencia sería la siguiente: al principio, el campo magnético no penetra en el superconductor (estado Meissner). A continuación, se alcanza el estado mixto: para un valor llamado campo magnético crítico inferior, empieza a penetrar en algunas zonas del material, mientras otras permanecen superconductoras (libres, por tanto, de líneas de campo magnético). Por último, cuando el campo magnético alcanza un valor conocido como campo crítico superior, el material deja de ser superconductor y pasa al estado normal.

Las zonas no superconductoras del estado mixto donde penetra el campo magnético aplicado están delimitadas por vórtices. Estas corrientes de electrones superconductores giran alrededor de tubos de líneas de campo magnético. En el núcleo del vórtice —equivalente al ojo del huracán—, los electrones se encuentran en estado normal. Su diámetro es del orden del parámetro superconductor denominado longitud coherente, que depende del material de que se trate y se halla directamente ligado a las fluctuaciones de la densidad de electrones superconductores en el material. El vórtice de supercorrientes apantalla al núcleo y las líneas del campo magnético que lo atraviesan, de forma que fuera de él no se siente su efecto destructor de la superconductividad.

Abrikosov explicó este comportamiento de una manera muy clara: en virtud de la relación entre dos longitudes típicas superconductoras (la longitud coherente y la longitud de penetración), el material será o un superconductor de tipo I, sin estado mixto, o de tipo II, con estado mixto. Adviértase que la longitud de penetración es algo mayor que el "ojo" del vórtice; fuera de ella, el campo no tarda en anularse.

En el estado de vórtices importa otra característica; a saber, el número de zonas donde penetra el campo magnético es el mayor posible para el valor de campo aplicado. Con otras palabras, cada zona donde el material se halla en estado normal es lo más pequeña posible. Dicho tamaño mínimo de las partes donde penetra el campo viene determinado por otro efecto cuántico macroscópico, propio de los superconductores: en un superconductor, se halla cuantizado el flujo magnético.

Por flujo magnético se entiende el producto del área donde ha penetrado el campo magnético por el valor del campo magnético en esa área. Al afirmar que se encuentra cuantizado indicamos que sólo puede valer un número entero de veces el valor del flujo unidad, el llamado "fluxoide", $\varphi_0 = 2{,}07 \times 10^{-7}$ gauss cm^2.

Por mor de claridad: cada vórtice superconductor genera en su interior un flujo magnético, que es precisamente un fluxoide. Este valor de campo es muy pequeño. Baste con imaginar un anillo de área 1 cm^2, donde el campo de un fluxoide sería de $2{,}07 \times 10^{-7}$ gauss, y compararlo con el valor del campo magnético terrestre, que es de 0,5 gauss, unos seis órdenes de magnitud mayor. Por lo tanto, con un dispositivo superconductor que cuente el número de fluxoides pueden medirse campos magnéticos muy débiles en unidades de $2{,}07 \times 10^{-7}$ gauss. Estos dispositivos reciben el nombre de SQUID. A ellos se recurre para medir los campos magnéticos creados por la actividad cerebral. Las corrientes eléctricas que transmiten la actividad cerebral en las neuronas llevan asociados campos magnéticos del mismo orden que los detectables por los SQUID.

2. EN UN DIAGRAMA DE FASES que representa el comportamiento de un material superconductor de tipo II (aleaciones y compuestos, el vanadio y el niobio) para los distintos valores del campo magnético aplicado H y de la temperatura T se distinguen tres zonas. En la primera (el estado Meissner), el superconductor no admite líneas de campo en su interior. Sucede así hasta un valor de campo aplicado determinado, el campo crítico inferior (H_{c1}). En la segunda zona (el estado mixto, de vórtices o de Abrikosov), el campo magnético penetra en el superconductor en forma de tubos dispuestos en una red de vórtices. En el estado mixto, coexisten zonas superconductoras (donde no hay vórtices) y zonas en estado normal (donde se generan los vórtices). Cuando el campo aplicado supera el valor H_{c2}, o campo crítico superior, el material se halla en estado normal y desaparece la superconductividad.

MARIA PILAR GONZALEZ, JAVIER VILLEGAS, ELVIRA M. GONZALEZ Y JOSE LUIS VICENT

Vórtices en reposo y vórtices en movimiento

Supongamos un superconductor de tipo II con un campo magnético

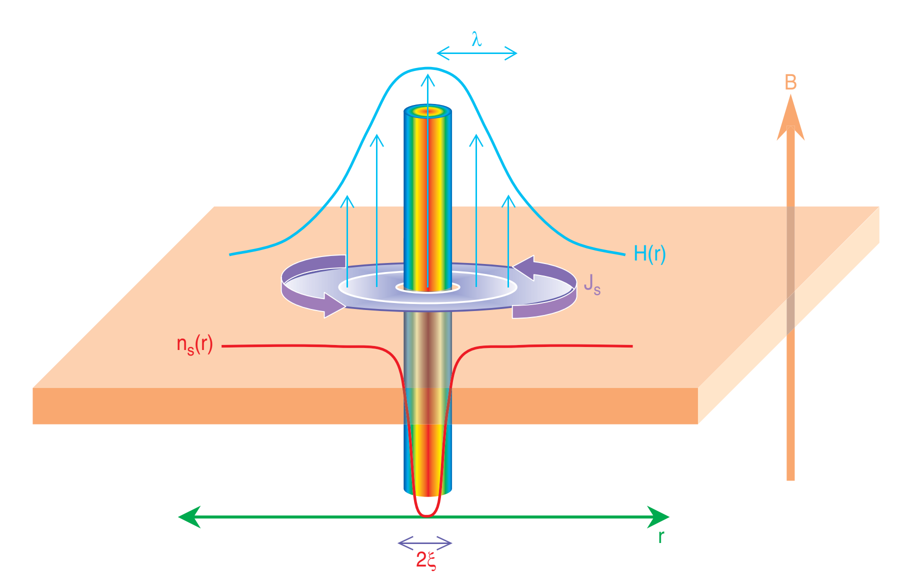
aplicado intermedio entre el valor inferior y el valor superior. Será, pues, un superconductor en el estado de vórtices. Nos podemos hacer varias preguntas: ¿Cómo entran esos vórtices? ¿De manera desordenada u ordenada? ¿Podemos saber algo de su estructura? ¿Se mueven los vórtices? Si se mueven, ¿es controlable ese movimiento? Analicemos tales cuestiones.

La teoría del estado mixto (Abrikosov) y las pruebas experimentales aportadas por la visualización de los vórtices mediante diversas técnicas de microscopía contestan a la primera de las preguntas. Los vórtices no entran ni se sitúan en el superconductor de cualquier manera, sino que forman una red perfecta de simetría triangular. (El lado del triángulo, o "parámetro de la red", a_0, viene dado por la expresión $a_0 = (\varphi_0/B)^{1/2}$, siendo φ_0 el fluxoide y B el valor del campo aplicado.)

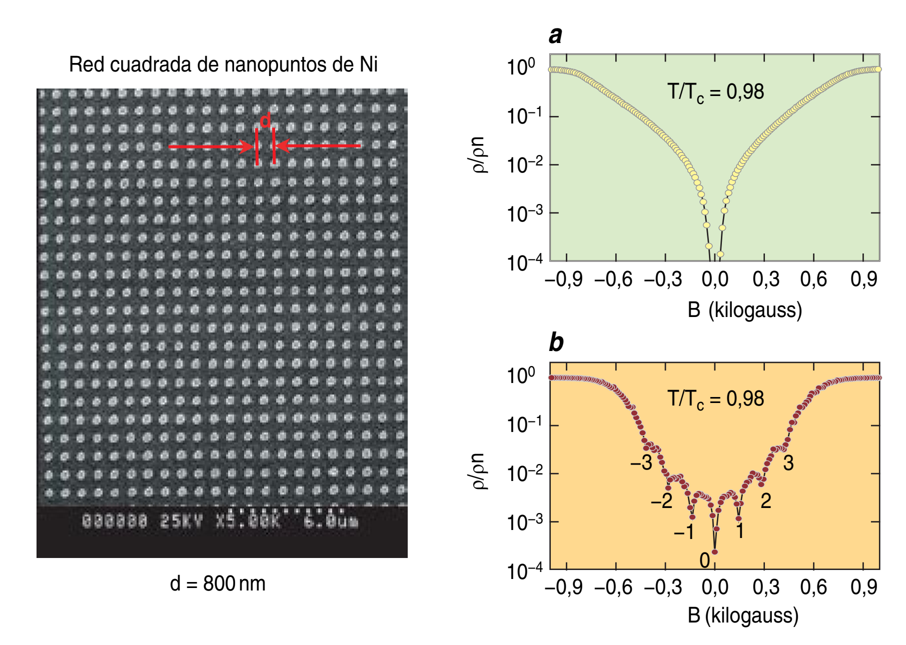
Así será sólo en un sólido perfecto. En realidad, la red de vórtices estará distorsionada por los defectos que tenga el sólido. El espacio ocupado por un vórtice en el material se encuentra en estado normal, es decir, se requiere un gasto de energía para que esa zona pase de superconductora a normal. Ahora bien, si en esa zona o en parte de ese volumen que va a ocupar el vórtice hay un defecto, una *falta* de material, el vórtice preferirá colocarse en él porque así tendrá que gastar menos energía: no habrá de destruir la superconductividad donde, desde un principio, no hay material superconductor. Por lo tanto, la competencia entre la energía necesaria para que los vórtices formen una red de Abrikosov y la necesaria para que se sitúen —se "anclen"— en los defectos de la red cristalina determina la simetría y los *defectos* de la red de vórtices, o red de Abrikosov, en un superconductor de tipo II.

Resumiendo: la red de Abrikosov de simetría triangular está distorsionada por los defectos del material. ¿Cualquier tipo de defecto anclará de manera eficiente los vórtices? La respuesta lógica es no: sólo lo harán los defectos de un tamaño equiparable al del vórtice.

Sea un material superconductor de tipo II al que se aplica un campo a una temperatura tal, que se encuentre



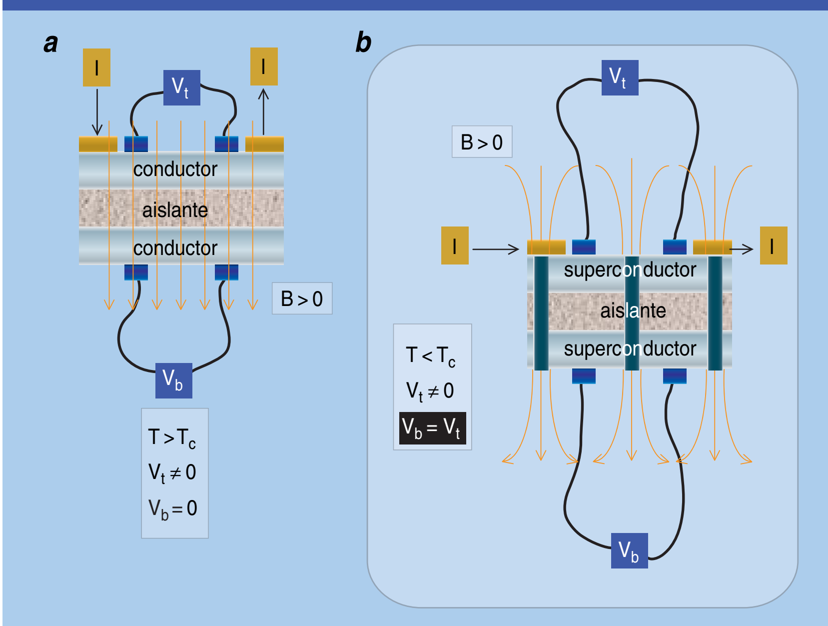
3. ESTRUCTURA DE UN VORTICE SUPERCONDUCTOR. La zona central de un vórtice tiene por radio una longitud característica del superconductor, la longitud coherente (ξ). En esa zona central, el material y los electrones se encuentran en estado normal: la densidad de electrones superconductores n_s, como función de la distancia r al centro del vórtice, se hace nula en el núcleo del vórtice. El campo magnético exterior B penetra en el material a lo largo de una longitud también característica del material superconductor, la longitud de penetración (λ), fuera de la cual se hace muy pequeña, hasta desaparecer (H(r) es su valor). Estas dos longitudes miden entre unos pocos y miles de nanómetros, si bien lo habitual es que sean de unos cientos de nanómetros. (Un átomo mide del orden de 0,1 nanómetros.) Finalmente, alrededor del núcleo del vórtice aparecen corrientes superconductoras J_s.



4. SI SOBRE UNA RED DE NANOPUNTOS de níquel (*fotografía de microscopía electrónica de la izquierda*) se deposita una lámina superconductora de tipo II, se observará, en función del valor del campo magnético B que se aplique, un resultado llamativo: aparecerán mínimos equiespaciados de la resistencia ρ del superconductor (*b*), en vez del cambio uniforme que se produce sin red de defectos (*a*).

MARIA PILAR GONZALEZ, JAVIER VILLEGAS, ELVIRA M. GONZALEZ Y JOSE LUIS VICENT

EL TRANSFORMADOR DE GIAEVER



En el panel *a* se presenta un experimento sin mucho interés. Se aplica un campo magnético B, perpendicular a una tricapa, emparedado que está fabricado con un metal en la capa superior, un aislante grueso en la capa intermedia y otro metal en la capa inferior. Cuando se hace pasar corriente eléctrica por la capa superior con un voltaje V_t, no hay corriente eléctrica en la capa inferior (es decir, el voltaje V_b en la capa inferior será nulo), pues lo impide la capa gruesa aislante intermedia. La aplicación o no de un campo magnético no desempeña ningún papel. Se nos ofrece un panorama distinto, si se repite el experimento con las dos capas metálicas en estado superconductor, a una temperatura inferior a la crítica T_c (*b*). Entonces, las líneas de campo en el material se convierten en vórtices (tubos rígidos con electrones en estado normal en su interior). Al inyectar una corriente en la capa superior, aparece una fuerza de Lorentz sobre los tubos; si esta fuerza es superior a la necesaria para desanclar los vórtices (una corriente aplicada superior a la crítica), éstos se moverán y la caída de potencial que medirá un voltímetro será la misma en la capa superior que en la inferior. Para conocer la corriente en el caso de conducción normal, se cuenta el número de portadores (electrones) que pasan por unidad de tiempo entre los electrodos de potencial. En el caso de un superconductor se cuenta el número de vórtices, con electrones en estado normal en sus núcleos, que pasan por unidad de tiempo entre los electrodos de potencial. Mientras que en el caso del estado normal los portadores de corriente disipativa (resistencia) son electrones, en el caso de un superconductor en el estado mixto los portadores de corriente disipativa (con la consiguiente resistencia) son los vórtices.

MARIA PILAR GONZALEZ, JAVIER VILLEGAS, ELVIRA M. GONZALEZ Y JOSE LUIS VICENT

en estado mixto, con vórtices que formen una red más o menos distorsionada según los defectos de la muestra. Si inyectamos una pequeña corriente externa en el material y vamos aumentándola, al principio no se observará resistencia al paso de la corriente, mas por encima de cierto valor se medirá ya resistencia: el superconductor habrá empezado a disipar. Una ley general, bien conocida en física, nos dice que cuando se aplican simultáneamente a un cuerpo un campo magnético y una corriente eléctrica se produce una fuerza (la fuerza de Lorentz) sobre los portadores de corriente. Cuando aumenta la corriente, aumenta la fuerza sobre los portadores. ¿Cómo puede este efecto explicar el comportamiento de los superconductores en estado mixto? Esto es, ¿cómo explicar que pasen de no disipar a hacerlo al aumentar la corriente aplicada?

Al empezar a aplicar la corriente, la fuerza sobre los portadores —los electrones en estado normal, situados en el núcleo de los vórtices— es débil, la red de vórtices sigue anclada y no se mueve; en consecuencia el sólido sigue siendo un superconductor por donde pasa corriente sin disipar. Ahora bien, cuando la fuerza de Lorentz inducida por la corriente adquiere intensidad suficiente para desanclar la red de vórtices, éstos se moverán.

Los vórtices tienen electrones normales en el núcleo. Cuando los electrones en estado normal se desplazan, producen disipación y resistencia en el material. Tendremos, por tanto, una red real de vórtices que se mueve por el superconductor disipando energía. El valor de la corriente necesario para desanclar la red de vórtices y moverla recibe la denominación de corriente crítica. El valor en cuestión depende del sólido superconductor de que se trate (de los defectos intrínsecos que tenga, entre otras cosas), de su temperatura y del valor del campo magnético aplicado.

Nos costará ahora menos abordar la última pregunta: ¿es controlable el movimiento de la red de vórtices? Será controlable si se pueden introducir en el sólido defectos del tamaño y orden adecuados.

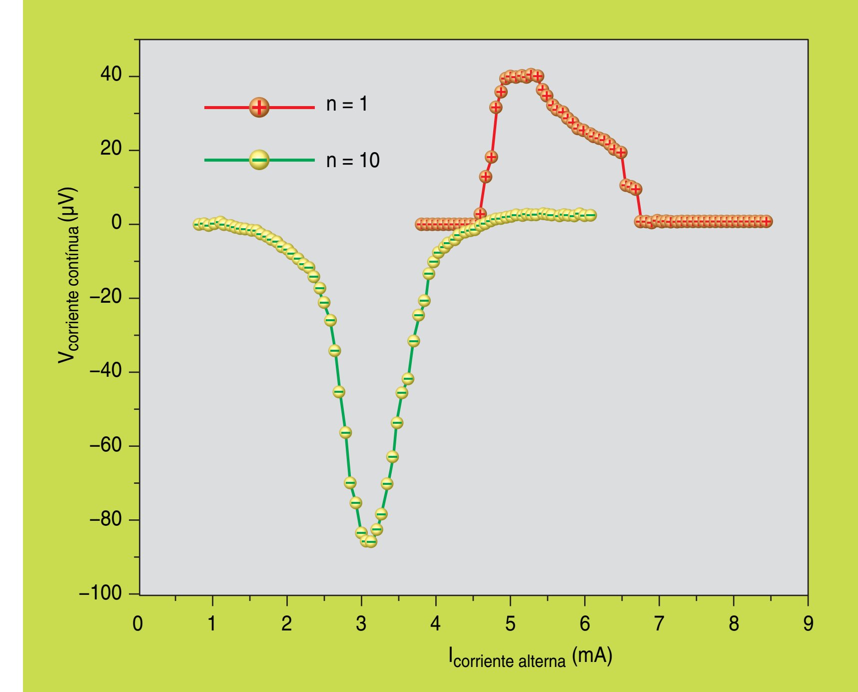
Movimiento controlado de la red de vórtices

Uno de los temas de mayor relevancia en superconductividad es conseguir que aumente la corriente crítica del material; es decir, el intervalo de corriente por debajo del cual el sistema actúa como superconductor: sin disipar ni gastar energía al paso de la corriente. Si se introducen defectos adecuados en el material, se favorecerá que los vórtices permanezcan anclados y, por lo tanto, no haya disipación al pasar corriente. Cuando la intensidad de la corriente inyectada supera el valor de la corriente crítica, los vórtices se desanclan y el material conduce con resistencia (disipa).

Un nuevo campo del estudio de la superconductividad ha despertado interés: introducir defectos en el material para conseguir que, cuando se aplique una corriente superior a la crítica, el movimiento de vórtices y la consiguiente disipación puedan guiarse artificialmente.

En los últimos años, el avance en las técnicas de litografía a escala nanométrica ha permitido, entre otras muchas cosas, la fabricación de su-

EL RECTIFICADOR DE VORTICES



Cuando la red de defectos superpuesta a la lámina superconductora está formada por defectos sin simetría de reflexión en alguna dirección, como ocurre cuando tienen forma triangular, se alcanza la situación ideal para un experimento de rectificación de la corriente eléctrica: inyectando en la lámina (que se encuentra a una temperatura muy cercana a la temperatura crítica del material superconductor de que está hecho) una corriente alterna *I*, lo que hace oscilar los vórtices, se tiene a la salida una diferencia de potencial continua *V*. Con miliampère de alterna se obtienen microvolt de continua; se trata de un efecto no despreciable. El origen de este fenómeno se esconde en el "efecto trinquete": partículas que se mueven sobre potenciales asimétricos producen un movimiento neto en una dirección, aunque la fuerza sobre ellas sea en promedio nula. Al aumentar el número de vórtices *n* de uno por defecto de la red a diez, se observa un cambio de polaridad en el efecto, debido a que los vórtices, al ser excesivo su número, empiezan a no poder anclarse en los defectos. Van situándose entonces entre defectos y la rectificación cambia de sentido, ya que el defecto asimétrico que "ven" está invertido respecto al defecto real.

MARIA PILAR GONZALEZ, JAVIER VILLEGAS, ELVIRA M. GONZALEZ Y JOSE LUIS VICENT

perconductores con defectos nanométricos. Además, es posible fabricarlos de suerte tal, que se dispongan de modo regular en cuanto a su periodicidad y simetría.

En el laboratorio, desde hace tiempo, ha quedado establecida la posibilidad de dibujar, mediante técnicas ordinarias de fotolitografía, "motivos" o "redes" (*arrays*) de tamaño micrométrico. Los fotones hacen de pincel para escribir y dibujar el patrón deseado. La obtención reciente de polímeros (resinas) sensibles a la iluminación, no por fotones, sino por electrones, permite disminuir el tamaño de los motivos y entrar en el rango submicrométrico. Con esta técnica se puede fabricar una lámina delgada superconductora en cuyo interior se hayan introducido defectos ordenados nanométricos, de un tamaño parecido al de los parámetros superconductores relevantes. Esos defectos actuarán como centro de anclaje de los vórtices.

Cuando se aplica una corriente superior a la crítica, la red de vórtices se desancla y se pone en movimiento. El material adopta el estado mixto y se mide una resistencia, debida exclusivamente al movimiento de los vórtices. Si se varía al mismo tiempo el valor del campo magnético aplicado, cambiará el número de vórtices en el superconductor. A medida que el campo vaya aumentando, se observará algo nuevo: que para valores determinados del campo magnético se producirá una drástica disminución de la disipación o resistencia. Estos valores están equiespaciados: la diferencia del campo magnético entre dos mínimos sucesivos es siempre la misma.

Para comprenderlo, pensemos en la situación experimental. Una red de vórtices se mueve en un superconductor que contiene una red de defectos nanométricos periódicos. Aumentar el campo magnético significa aumentar el número de vórtices; o lo que es lo mismo, cambiar el parámetro de la red supone disminuir la distancia entre vórtices. Cuando la red de vórtices resulta idéntica a la red de defectos del superconductor —cuando se tiene un vórtice por defecto—, la red de defectos desarrolla una interacción máxima con la red de vórtices. Tal ajuste entre las dos redes lleva a que la red de vórtices ralentice su movimiento, con lo que se reduce la resistencia. Cada vez que el campo magnético aplicado corresponda a una red de vórtices múltiplo de la red de defectos, o lo que es lo mismo, cada vez que haya un número entero de vórtices por cada defecto de la red de defectos, se alcanzará un mínimo en la curva que representa la resistencia como función del campo magnético aplicado.

Una vez demostrado ese efecto experimental, se entiende que con una adecuada red de defectos y valores oportunos del campo aplicado pueda manipularse la dinámica de la red de vórtices. A continuación veremos un ejemplo muy llamativo: un rectificador de corriente o, en otras palabras, cómo inyectando corriente alterna en el dispositivo se obtiene una diferencia de potencial continua.

El rectificador nanométrico superconductor

Uno de los temas de investigación a los que viene dedicándosele mayor esfuerzo concierne al desarrollo de dispositivos electrónicos que realicen las funciones de la electrónica común, pero con dimensiones nanométricas. Se trataría de dispositivos de unas decenas de miles de átomos (la distancia entre átomos en un sólido es del orden de unas décimas de nanómetro). La tendencia actual

de la técnica es hacia la miniaturización y aumento de la rapidez de respuesta. Desgraciadamente, el tamaño nanométrico impone al paso de la corriente restricciones obvias. La disipación del calor generado en un espacio tan reducido dicta claramente una de ellas. Tanto en este aspecto como en el de conseguir una mayor velocidad de respuesta del dispositivo, los materiales superconductores se erigen en una solución muy aprovechable.

Un trinquete es una palanca que impide que una rueda dentada gire en una de las dos direcciones en que podría hacerlo. El movimiento térmico de las moléculas del medio en que estuviese sumergido ese mecanismo haría, sin el trinquete, que el engranaje girase en uno u otro sentido. Con el trinquete, en cambio, se produciría movimiento sólo en una dirección. Parece, pues, que se podría efectuar de ese modo, al menos en principio, un trabajo sin necesidad de una fuente externa de energía. Feynman demostró que el equilibrio térmico impedía que ocurriese tal cosa. Ahora bien, si una fuente externa de energía mantiene un desequilibrio, térmico o químico, sí podrá efectuarse un trabajo: el trinquete y el engranaje funcionarán como un motor molecular, y lo mismo valdrá, más en general, para un sistema anisótropo, es decir, con preferencia por una dirección, que actúe como "trampa asimétrica" para las partículas que interaccionan con él. El resultado será un movimiento neto, un flujo neto de las partículas en una dirección determinada, aunque sobre ellas no actúe una fuerza neta externa. Esta situación, tan anómala en la experiencia diaria, es la que nos mantiene vivos. En el interior de las células de los organismos vivos las proteínas se desplazan en medio del caos térmico gracias a motores biológicos basados en ese efecto trinquete. Estos sistemas se han convertido en uno de los temas más de actualidad, tanto en la investigación teórica como en la experimental.

Los superconductores son ideales para este tipo de experimentos. Tenemos todos los ingredientes precisos; los hemos detallado en las líneas anteriores. Los vórtices son las partículas que se mueven fuera del equilibrio, sin estar bajo el efecto de una fuerza externa neta (para que sea así, se inyecta una corriente alterna en el material). Sólo se necesitan los centros asimétricos. Basta con que, en vez de redes de nanopuntos, se dispongan redes de nanotriángulos. El resultado es inmediato. Fórmese un superconductor sobre una red de triángulos (las trampas trinquete), aplíquese un campo magnético (las "partículas", es decir, los vórtices), inyéctese una corriente alterna (situación fuera del equilibrio) y mídase la diferencia de potencial: se obtendrá una caída de potencial continua, es decir, un movimiento de los vórtices en una dirección, aunque no exista una fuerza neta aplicada en esa dirección. Se habrá conseguido así un rectificador superconductor.

Los autores

María Pilar González y **Javier Villegas** están haciendo la tesis sobre vórtices superconductores en el laboratorio de Superconductividad y Películas Delgadas de la Universidad Complutense de Madrid. **Elvira González** investiga en dicho laboratorio con un contrato Ramón y Cajal. **José Luis Vicent** es catedrático de física en la Universidad Complutense.

Bibliografía complementaria

THE FEYNMAN LECTURES ON PHYSICS. R. P. Feynman, R. B. Leighton y M. Sands. Capítulo 46. Addison-Wesley, Reading, MA, 1963.

FLUX PINNING IN A SUPERCONDUCTOR BY AN ARRAY OF SUBMICROMETER MAGNETIC DOTS. J. I. Martín, M. Vélez, J. Nogués y I. K. Schuller en *Physical Review Letters*, vol. 79, págs. 1929-1932; 1997.

WHY VORTICES MATTER. P. Gammel en *Nature*, vol. 411, págs. 434-435, 24 de mayo, 2001.

A SUPERCONDUCTING REVERSIBLE RECTIFIER THAT CONTROLS THE MOTION OF MAGNETIC FLUX QUANTA. J. E. Villegas, S. Savel'ev, F. Nori, E. M. González, J. V. Anguita, R. García y J. L. Vicent en *Science*, vol. 302, págs. 1188-1191, 14 de noviembre de 2003.



¿Se puede curar la rabia?



Rodney E. Willoughby Jr.

La supervivencia de una adolescente que contrajo la rabia podría indicar el camino hacia un tratamiento eficaz

La rabia constituye una de las enfermedades más antiguas y temidas. Ataca el cerebro. Provoca inquietud, pánico y convulsiones. Las víctimas padecen dolorosos espasmos en la garganta cuando comen o beben. Luego viene la parálisis. Las personas infectadas por la rabia permanecen conscientes de forma intermitente casi hasta la muerte; transmiten su miedo y sufrimiento a familiares y cuidadores.

Aunque las vacunas contra el virus de la rabia evitan que se desarrolle la enfermedad, hasta hace poco los médicos no podían albergar ninguna esperanza para los pacientes que no habían sido inmunizados poco después de sufrir la mordedura de un animal rabioso. Una vez aparecían los síntomas de la infección (en los dos meses posteriores al mordisco), la muerte resultaba inevitable, generalmente en menos de una semana. Hasta que, en 2004, salvamos de semejante sino a una niña de 15 años, en el Hospital Infantil de Wisconsin, en Milwaukee.

Jeanna Giese, de Fond du Lac (Wisconsin), se convirtió en el primer caso conocido de una persona no inmunizada que sobrevivía a la rabia. (Hay otros cinco casos de personas que, habiendo sido inmunizadas, desarrollaron la rabia y también sobrevivieron.) El "protocolo de Milwaukee", así se reconoce nuestro novedoso tratamiento, ha sido objeto de controversia entre los expertos. Hay quien aduce que la curación de Jeanna fue una casualidad, pues los escasos intentos en los que se ha repetido el tratamiento no han salvado la vida de ningún otro paciente de rabia.

Pero estamos convencidos de hallarnos en el camino correcto. El próximo paso consistirá en realizar estudios sobre animales para determinar cuál de los elementos de nuestro protocolo ayuda a vencer la rabia.

Una cura para la rabia sería una bendición para los países en vías de desarrollo. La enfermedad se ha convertido en una rareza en los EE.UU. y en Europa, tras unas extensas campañas de salud pública que han terminado por eliminar prácticamente el virus en los animales domésticos (perros, gatos y ganado). Sólo dos o tres estadounidenses mueren cada año a causa de la rabia; ello significa que la probabilidad de que un individuo contraiga la enfermedad en EE.UU. es de una entre 100 millones.

En cambio, la Organización Mundial de la Salud estima que en Asia, Africa e Iberoamérica la rabia mata al año a 55.000 personas, la mayoría infectadas por mordeduras de perro. Si se desarrollara, a partir del análisis del protocolo de Milwaukee, un tratamiento barato y eficaz, se salvarían miles de vidas.

Mordeduras de murciélago

La rabia es un virus de ARN envuelto en cápside. Con otras palabras, su material genético es ácido ribonucleico, no el desoxirribonucleico (ADN) que poseen los humanos y, en verdad, el resto casi absoluto de las formas de vida. El virus, con aspecto de bala, invade las células humanas y las obliga a generar nuevas copias del mismo, que causan su inmenso daño mediante la síntesis de sólo cinco proteínas. El virus de la rabia se halla perversamente adaptado para medrar en el cerebro y los nervios. No suele darse en otras partes del organismo.

JOE McDONALD *Corbis*

Después de transmitirse con la mordedura de un animal rabioso, que introduce saliva infectada en la herida abierta, el virus se multiplica en la zona del músculo o piel interesada. Durante esa fase, el patógeno pasa inadvertido para el sistema inmunitario, pues se halla en cantidades nimias y no se desplaza por el torrente sanguíneo o por los nódulos linfáticos. Ese período de incubación "asintomático" suele durar entre dos y ocho semanas, pero puede alargarse años incluso. En algún momento, el virus alcanza un nervio y se introduce en él. La suerte está echada.

A finales del siglo XIX, Louis Pasteur descubrió que la inyección de virus de la rabia muertos estimulaba en el sistema inmunitario la producción de anticuerpos contra el microorganismo. Además, Pasteur se percató de que el tiempo que tardaba el organismo en desarrollar la respuesta inmunitaria era más corto que el período de incubación de la enfermedad. Inoculó virus muertos extraídos de la médula espinal de conejos infectados en personas mordidas por perros rabiosos; los pacientes sobrevivieron gracias a la adquisición de inmunidad previa a la aparición de los síntomas. Dado que la rabia prosigue su desarrollo en el intervalo comprendido entre la inmunización y la respuesta inmunitaria, en la actualidad, para salvar este lapso, los médicos inyectan también anticuerpos específicos contra la rabia. Una correcta limpieza de la herida con agua y jabón (que mata al virus porque elimina su membrana) resulta eficaz. Desde que en 1975 se introdujo en los EE.UU., dicha profilaxis posterior a la exposición al virus (cuidado de la herida, cinco dosis de una vacuna segura y una dosis de anticuerpos) no ha fallado nunca.

La lucha de Jeanna contra la rabia comenzó cuando un murciélago se estampó contra una ventana interior de su iglesia durante un servicio religioso. Cuando lo recogió del suelo, sujetándolo por los extremos de las alas para liberarlo al exterior, el murciélago arremetió contra la mano izquierda de Jeanna: sufrió un corte de medio centímetro en el dedo índice.

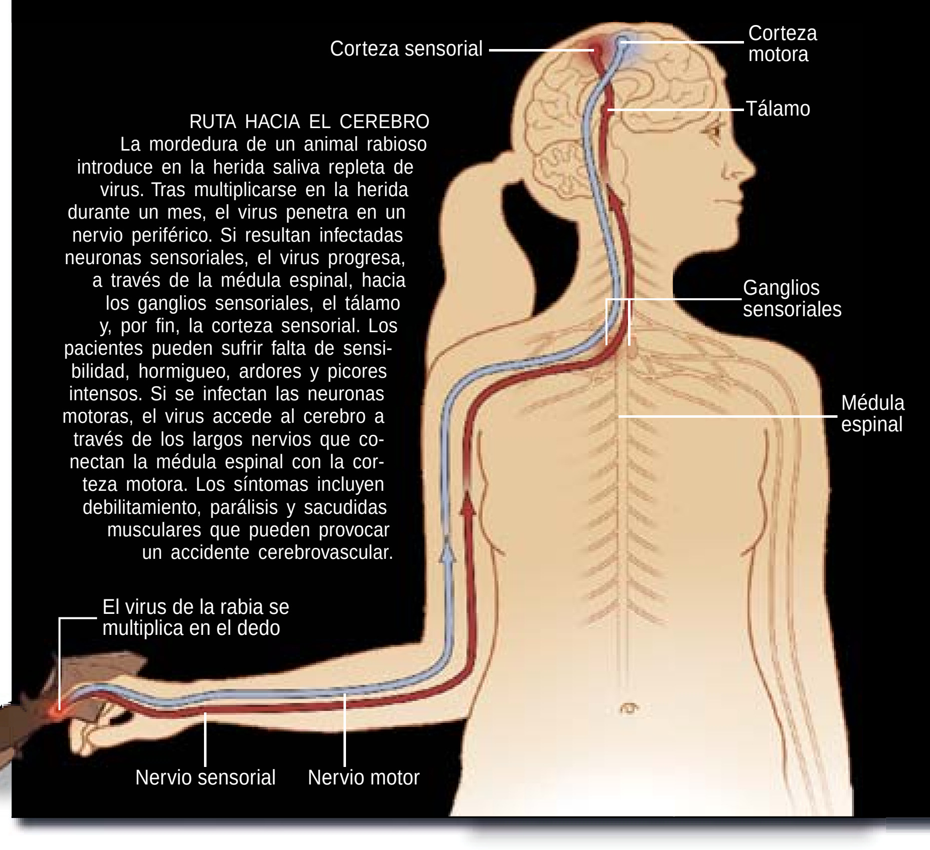
Los dientes de los murciélagos son pequeños y muy afilados. Sus mordiscos apenas se notan; cuesta localizarlos. Por ello, se recomienda la vacunación contra la rabia a todo el que ha estado en contacto con un murciélago o ha dormido en una habitación donde se ha descubierto un murciélago (a menos que se capture el animal y los análisis demuestren que no está rabioso). Jeanna se limpió el arañazo con agua oxigenada, pero no se preocupó de vacunarse. Si lo hubiese hecho, probablemente hubiese acabado el curso escolar sin mayores complicaciones.

El virus de la rabia se multiplicó en el dedo de Jeanna durante cerca de un mes; luego, infectó un nervio y avanzó rápidamente hacia el cerebro, a una velocidad de un centímetro por hora. Puesto que se encamina exclusivamente hacia el sistema nervioso, donde muchos tipos de células inmunitarias no operan, el organismo no detecta al virus hasta que éste se ha infiltrado de forma masiva en la médula espinal y en el cerebro.

En última instancia, el paciente de rabia acaba desarrollando una parálisis total, derivada de la infección de los nervios motores y la pérdida completa de los sentidos que dependen de los nervios sensoriales infectados. Se desconoce el mecanismo que subyace tras esa

ASI ATACA EL VIRUS DE LA RABIA

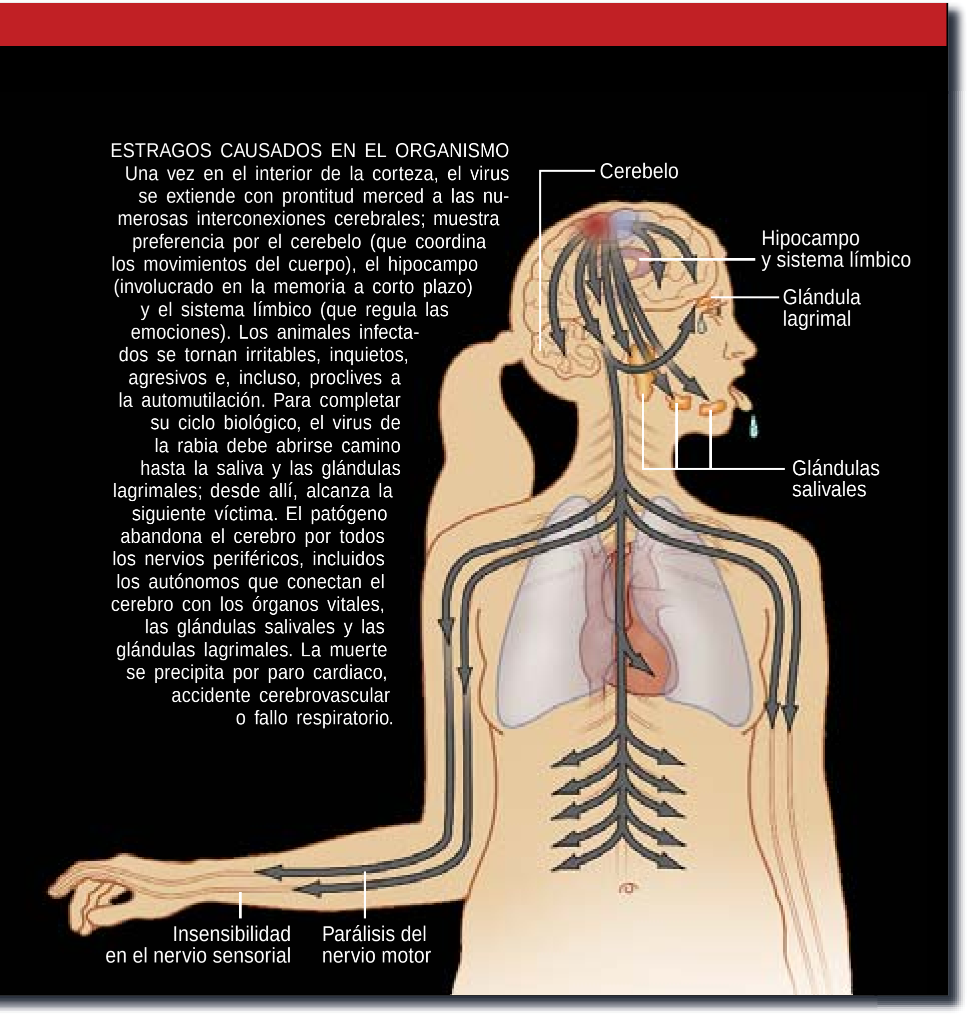
Las vacunas contra el virus de la rabia previenen el desarrollo de la enfermedad si se administran poco después de que el paciente haya sufrido la mordedura de un animal rabioso. Para los que no reciben tal inmunización, la enfermedad resulta mortal.



TAMI TOLPA

Resumen/*El enigma de la rabia*

- En 2004, se salvó la vida de una adolescente que contrajo la rabia por la mordedura de un murciélago. El tratamiento consistió en la inducción del coma y la administración de fármacos antivíricos y neuroprotectores.
- No se sabe por qué funcionó el tratamiento. No ha vuelto a repetirse el éxito. Los expertos necesitan estudiar la terapia en animales rabiosos, pero las facultades de veterinaria se muestran reticentes a colaborar.
- Un tratamiento contra la rabia barato y eficaz salvaría miles de vidas en los países en vías de desarrollo, donde la prevalencia de la enfermedad es todavía notable.



Es casi seguro que ni mis colegas ni yo hubiésemos acertado a diagnosticar la rabia, de no ser por el médico local de Jeanna, Howard Dhonau, que interrumpió su fin de semana para ayudarnos. Siguió uno de los consejos básicos que se da a los estudiantes que empiezan la carrera: volvió a preguntar qué era lo que había sucedido. Así se enteró de lo del murciélago. Conocer los antecedentes resultó fundamental para afinar el tratamiento.

Como medida de precaución, sugerí que el equipo que iba a transportar a Jeanna a nuestro hospital se vistiese con la indumentaria protectora. Aunque no se tienen pruebas de que la rabia se transmita entre humanos, las lágrimas y la saliva de los animales rabiosos están repletas de virus que pueden contaminar heridas y membranas mucosas (de ojos, nariz y boca); así es como la rabia se perpetúa en la naturaleza.

En el transcurso del primer mes de enfermedad, el personal médico encargado de cuidar a Jeanna se ponía gafas protectoras, mascarilla, bata y guantes. El diagnóstico de la rabia requería análisis de saliva, piel, sangre y líquido cefalorraquídeo. Se enviaron las muestras a la sección especializada en rabia del Centro para el Control y Prevención de Enfermedades (CDC) de Atlanta. Los primeros resultados llegaron en menos de 24 horas.

pérdida de actividad neuronal. Tampoco se comprende exactamente el modo en que mata la rabia al paciente. La muerte llega de diversas formas: accidente cerebrovascular, parada cardiaca o fallo respiratorio. Según parece, el virus de la rabia induce al cerebro a sabotear los órganos vitales. En esa observación se inspiró nuestro tratamiento para Jeanna.

En octubre de 2004, un mes después de sufrir la mordedura, Jeanna, estudiante brillante y estrella del equipo de voleibol del instituto, desarrolló una enfermedad parecida a la gripe. Perdió luego la sensibilidad de la mano izquierda y se le debilitó la pierna izquierda; tenía visión doble. Estuvo ingresada en el hospital local durante un fin de semana; empezó a manifestar letargo y falta de coordinación. Esos síntomas son típicos de la encefalitis (inflamación del cerebro), un trastorno frecuente que cada año afecta a varios miles de estadounidenses.

Hay varios tipos de infecciones víricas o bacterianas que provocan encefalitis. Puede también venir desencadenada por una respuesta inmunitaria que se descontrola y termina causando inflamaciones en el cerebro.

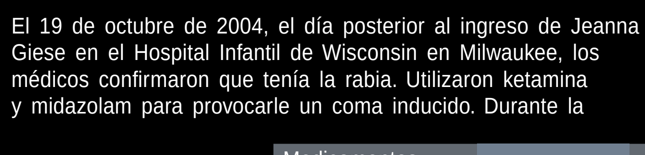
Puesto que las imágenes del cerebro de Jeanna eran normales y no mostraban ningún tipo de infección o apoplejía, los médicos supusieron que padecía una forma de encefalitis autoinmunitaria posterior a la infección. Todo apuntaba que entraría en coma y necesitaría ventilación asistida. La trasladaron a nuestro hospital.

Mientras tanto examiné a Jeanna. Pese a mostrarse aletargada, ejecutaba órdenes sencillas. No podía mantener el equilibrio; su pierna izquierda estaba debilitada. Sus reflejos eran normales. Quedaban, pues, descartados el virus de la polio y el del Nilo Occidental. Su brazo izquierdo experimentaba sacudidas intermitentes. El cuadro clínico (falta de sensibilidad en la mano izquierda y sacudidas del brazo izquierdo, coincidiendo con la localización de la mordedura del murciélago) indicaba que se trataba de la rabia y no de las infecciones habituales que causan encefalitis.

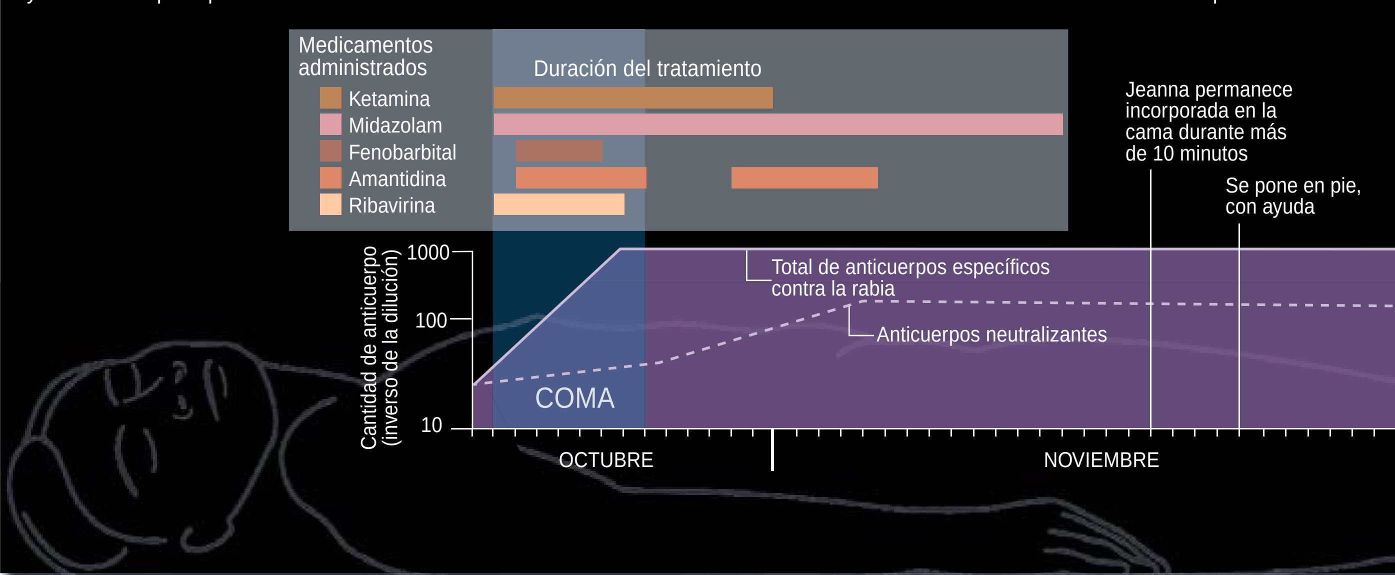
Sin embargo, dado que es más frecuente que los médicos perciban una manifestación atípica de una enfermedad común que una enfermedad rara, aseguré a la familia de Jeanna, a las enfermeras y a mí mismo que era casi imposible que tuviese la rabia. Pensaba en otro tipo de encefalitis, quizá de tipo autoinmunitario, cuya incidencia es unas mil veces mayor.

Teníamos 24 horas para diseñar un plan en caso de que estuviese equivocado. Mientras visitaba a otros pacientes me concentré en una tarea fundamental en medicina: documentarme. Según lo establecido, una vez que aparecen los síntomas, no existe tratamiento efectivo contra la rabia. Si ése era el diagnóstico, Jeanna podía considerarse muerta; todo lo que podíamos hacer era mitigar su sufrimiento. Pero la medicina avanza con-

EL TRATAMIENTO QUE SALVO A JEANNA



El 19 de octubre de 2004, el día posterior al ingreso de Jeanna Giese en el Hospital Infantil de Wisconsin en Milwaukee, los médicos confirmaron que tenía la rabia. Utilizaron ketamina y midazolam para provocarle un coma inducido. Durante la semana siguiente le administraron fenobarbital (sedante), amantidina (antivírico neuroprotector) y ribavirina (antivírico de uso general). Cuando Jeanna salió del coma, su sistema inmunitario fabricaba abundante cantidad de anticuerpos contra



tinuamente. Consulté la bibliografía médica en la Red en busca de algún descubrimiento reciente. Ninguna novedad de interés.

Luego, sabedor de que el desfase entre un descubrimiento médico y su publicación puede llegar a ser de hasta cinco años, me puse en contacto con Cathleen Hanlon, experta en rabia del CDC. Me comunicó un par de noticias desalentadoras. Por un lado, a Hanlon, el historial de Jeanna y los resultados de la exploración le sonaban a rabia; por otro, ni en los congresos científicos recientes ni en los ensayos clínicos en curso había surgido ningún avance prometedor.

Apremiaba el tiempo. Decidí seguir otra estrategia de búsqueda. Casi nadie ha sobrevivido a la rabia; prescindí, en consecuencia, de las publicaciones sobre el tratamiento de la enfermedad en humanos. Cuando se desarrolla un tratamiento, se estudian en primer lugar los efectos del fármaco en virus cultivados en tubos de ensayo. Aunque se trata de una etapa necesaria, es frecuente que los fármacos que parecen prometedores en los estudios preliminares resulten tóxicos o que no se puedan administrar en dosis adecuadas en el lugar de la infección. Dejé también de lado la bibliografía al respecto. Mas, al repasar los artículos restantes, caí sobre el enigma que venía desconcertando a los expertos desde hacía tres decenios: en el cerebro de los pacientes que mueren de rabia no se observa ninguna anomalía. Y lo que revestía pareja importancia: cuando los pacientes mueren a causa de la rabia tras varias semanas de cuidados intensivos, ya no se detecta el virus en su cuerpo. Con el tiempo, el sistema inmunitario humano elimina el virus, pero la erradicación procede con exasperante lentitud y no permite salvar la vida del paciente.

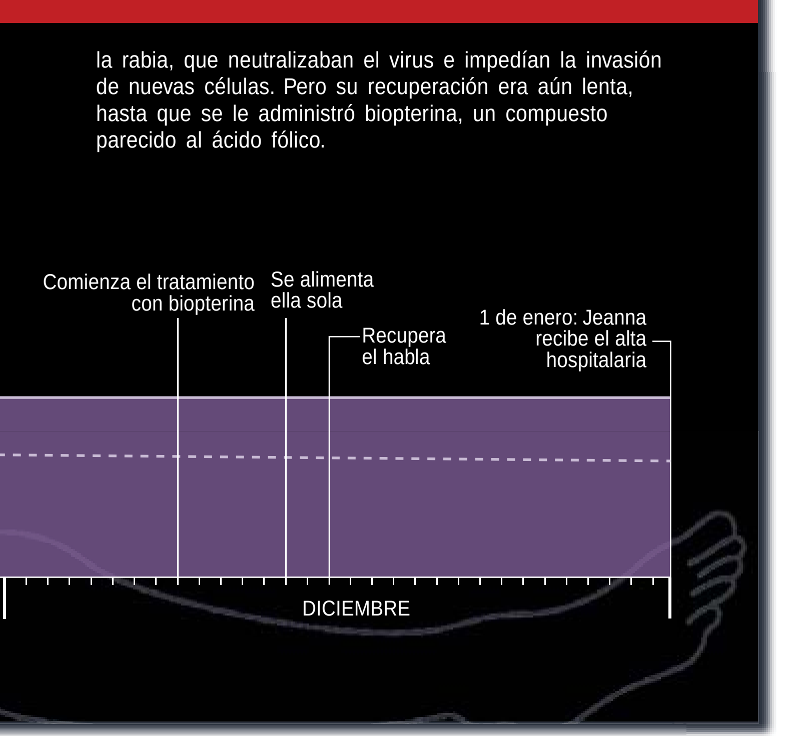
A partir de esos dos hechos, improvisamos una estrategia. Parecía que el virus de la rabia secuestraba el cerebro y provocaba la muerte del organismo, sin causar un daño directo en el tejido cerebral. Si pudiéramos inactivar el cerebro "aberrante" mediante un uso prudente de fármacos que sumiera a Jeanna en un estado de inconsciencia prolongada, se contendrían los terribles estragos desatados en su organismo; ello quizá la mantendría con vida el tiempo suficiente para que su sistema inmunitario avivase.

Para determinar qué medicamentos eran los más indicados, busqué en la bibliografía estudios que relacionasen la rabia con neurotransmisores (las moléculas que utiliza el cerebro para mandar señales de una célula a otra) o con la neuroprotección (el uso de fármacos u otras medidas para proteger el cerebro de posibles daños). Hallé un par de artículos asombrosos de Henri Tsiang, del Instituto Pasteur de París.

A primeros del decenio de los noventa, Tsiang y sus colaboradores descubrieron que la ketamina, un anestésico, inhibía el virus de la rabia en las neuronas corticales de la rata. El trabajo resultaba alentador por tres motivos. En primer lugar, la ketamina afectaba a una etapa fundamental del ciclo biológico del virus: el momento en que su información génica se transcribe en el interior de la neurona. En segundo lugar, el fármaco afectaba sólo al virus de la rabia y no a otros virus, lo que indicaba que su efecto no era el resultado de una toxicidad general contra el animal. En tercer lugar, una droga similar pero más tóxica, la MK-801, inhibía también la rabia en neuronas de rata. Los efectos beneficiosos se nos manifestaban asociados a una clase entera de compuestos químicos.

Durante más de 25 años, los cirujanos han usado la ketamina para inducir y mantener el estado de inconsciencia en los pacientes. En la actualidad, ha dejado de aplicarse ese anestésico por culpa de sus efectos alucinógenos. Otro aspecto interesante es que los efectos secundarios de la ketamina parecían proporcionar cierta posible ventaja a los pacientes de rabia. La ketamina opera como un neuroprotector mediante el bloqueo de receptores de glutamato NMDA, proteína de membrana que matan las neuronas que se han vuelto hiperactivas tras un accidente cerebrovascular u otro tipo de lesión cerebral. Imagine el lector mi excitación al hallar un

DANIELA NAOMI MOLNAR (*línea de tiempo*); TAMI TOLPA (*ilustración*)



fármaco que inhibía el funcionamiento incorrecto del cerebro, al propio tiempo que eliminaba el virus de la rabia y protegía al cerebro de mayores afrentas.

Una decisión desesperada

Como especialista en enfermedades infecciosas, no poseía la destreza necesaria para hacer entrar en coma a Jeanna de forma segura. Por tanto, apliqué otra de las normas fundamentales de la medicina: buscar ayuda. Solicité a Michael "Joe" Chusid, un experto veterano en enfermedades infecciosas, que me sugiriera un especialista en neuroprotección. Por suerte, ese día todos los expertos estaban disponibles. Kelly Tieves y Nancy Ghanayem, que estaban de guardia en la unidad de cuidados intensivos cuando ingresó Jeanna, tenían experiencia en la minimización de los trastornos cerebrales posteriores a un trauma y a operaciones a corazón abierto, respectivamente. Nuestro equipo incluyó también a Catherine Amlie-Lefond, neuróloga especializada en infecciones víricas, y a Mike Schwabe, experto en epilepsia. Schwabe se encargaría del seguimiento continuo de las ondas cerebrales para controlar el coma. George Hoffman, el anestesiólogo del equipo, reparó en que nuestro plan para inducir el coma constituía una práctica clínica rutinaria en el tratamiento de otras patologías.

Los miembros del equipo aconsejaron el uso de otros medicamentos para paliar los efectos secundarios de la ketamina, proporcionar neuroprotección adicional e inducir el coma, nuestro objetivo terapéutico. La amantidina, un antivírico, desconectaría también los receptores NMDA neuronales, uniéndose a ellos por un lugar distinto del que bloqueaba la ketamina. El midalozam, un sedante del grupo de las benzodiacepinas, y el fenobarbital nos ayudarían a suprimir la actividad del cerebro de Jeanna. Charles Rupprecht, especialista en rabia del CDC, recomendó la ribavirina, un antivírico de uso general. Aunque la ribavirina se había probado antes sin éxito en pacientes con rabia, no estábamos en condiciones de desatender el consejo de un experto.

La presencia redundante de especialistas nos permitió discutir la hipótesis y decidir sobre la seguridad de proceder y seguir adelante. La aplicación en medicina o biología de un método nuevo suele fracasar en el primer intento; a menudo, se provocan lesiones. Por ese motivo los tratamientos deben avanzar desde el tubo de ensayo hasta los ensayos clínicos en humanos, pasando por la experimentación sobre animales. Mi hipótesis parecía demasiado sencilla. El resultado médico podía ser espantoso, peor que la muerte: cuatro de las cinco personas que sobrevivieron a la rabia tras ser inmunizadas acabaron con graves discapacidades.

Después de que Rupprecht confirmase que Jeanna tenía la rabia, nos reunimos durante una hora. Comunicamos el diagnóstico a sus padres. Les explicamos las opciones habituales. Luego, propusimos nuestro tratamiento. Como la muerte de Jeanna estaba prácticamente garantizada, Ann y John Giese nos pidieron que intentásemos algo nuevo. Cuanto más se descubriera sobre la rabia, mejor podría tratarse el siguiente niño que contrajera la enfermedad.

Estimamos que el sistema inmunitario de Jeanna necesitaría entre cinco y siete días para fabricar anticuerpos contra el virus de la rabia. Sabíamos, de anteriores casos de rabia en humanos, que la respuesta inmunitaria natural es vigorosa una vez desatada. En vista de que el cerebro de Jeanna ya estaba repleto de virus de la rabia, no era probable que la inoculación de más virus (mediante una vacuna de virus muertos) resultase útil. Peor: podría resultar perjudicial, porque desviaría la respuesta inmunitaria natural, hasta entonces centrada en los virus que ya estaban presentes en el cerebro, hacia las variantes del virus más abundantes en la vacuna.

Por motivos similares, decidimos evitar una estimulación del sistema inmunitario de Jeanna mediante la inyección de anticuerpos específicos contra la rabia o interferones (proteínas que potencian la actividad inmunitaria). Le induciríamos el coma durante una semana. Durante ese período, se llevarían a cabo análisis de sangre y líquido cefalorraquídeo para confirmar que estaba fabricando sus propios anticuerpos.

En lugar de las alteraciones extremas que caracterizan la fase terminal de la rabia (drásticas oscilaciones en el ritmo cardiaco y en la presión sanguínea), no observamos crisis graves durante el coma de Jeanna. Hacia el final de la semana, su cuerpo empezó a producir grandes cantidades de anticuerpos neutralizantes que evitaban que el virus invadiese nuevas células y quizás erradicaban el patógeno mediante otros mecanismos desconocidos. Pero la prueba de fuego vendría cuando devolviésemos la conciencia a Jeanna.

El día en que la sacamos del coma fue el peor de mi vida. La niña se encontraba en parálisis total; no respondía a los estímulos. ¿Seguía allí? Ignorábamos lo que podría ocurrir a continuación. Con todo, sabíamos que los pacientes de rabia podían dar la falsa apariencia de muerte cerebral, razón por la cual no perdimos la esperanza. Al día siguiente, Jeanna intentó abrir los ojos; más tarde, aparecieron los reflejos en sus piernas. A los seis días, fijaba la mirada en el rostro de su madre y abría la boca para facilitar su limpieza a las enfermeras. A los 12 días estaba incorporada en la cama.



COMO DOMEÑAR UN VIRUS LETAL

Una vez que el virus de la rabia penetra en el axón de una neurona, el virus se desprende de su membrana; libera entonces proteínas y ARN, que se desplazan hacia el soma celular. El ARN vírico genera ARN mensajeros (transcripción), que utilizan luego la maquinaria celular para fabricar las cinco proteínas del virus (traducción). Entonces, el ARN vírico crea copias de sí mismo, que se ensamblan junto con las proteínas para formar nuevas copias víricas que emergen de las dendritas de las neuronas para atacar a otra neurona. Las investigaciones indican que la ketamina (*inserto*), un compuesto utilizado desde hace mucho tiempo como anestésico, inhibe la etapa de transcripción del ciclo biológico del virus.

TAMI TOLPA

La parálisis total da lugar a serios desajustes en el organismo. Se pierde la fuerza, la resistencia y la coordinación, así como la capacidad para tragar y hablar. La recuperación de Jeanna supuso un esfuerzo tremendo. Durante los dos primeros meses experimentó algunos retrasos desconcertantes: si bien progresó con celeridad en andar y hacer ejercicio, se mostraba incapaz de hablar o deglutir. Presentaba también trastornos metabólicos residuales; en particular, un exceso de ácido láctico.

Tras consultar con William Rhead, genetista del hospital, se le diagnosticó una deficiencia de biopterina adquirida. La molécula de biopterina guarda semejanza con el ácido fólico, la vitamina B esencial para el crecimiento celular. El compuesto se encuentra en el cerebro en cantidades limitadas, donde resulta crítico para la síntesis de dopamina, adrenalina, noradrenalina, serotonina, melatonina y otros neurotransmisores. La biopterina controla, además, la forma en que una enzima del cerebro, la óxido nítrico sintasa de las neuronas, mantiene el tono de los vasos sanguíneos que irrigan el cerebro.

Advertimos entonces que los niveles reducidos de biopterina explicaban la mayoría de los síntomas de la rabia que no correspondieran a los efectos tardíos sobre los nervios periféricos. Un descubrimiento de vital importancia, pues la biopterina está disponible en forma de suplemento oral.

Tras la administración de biopterina, Jeanna recuperó el habla y la capacidad de deglutir. Progresó a un ritmo sorprendente. Abandonó el hospital el 1 de enero de 2005, tres meses antes de lo esperado. Hemos confirmado la

deficiencia de biopterina también en el único paciente de rabia de quien se habían conservado muestras. Estamos estudiando si se observa un nivel de biopterina rebajado en otras especies animales infectadas por la rabia; de ser así, la alteración metabólica podría dar cuenta del mecanismo aplicado por el virus para arruinar el organismo. No está claro por qué la rabia deprime la concentración de biopterina (la mayoría de las infecciones cerebrales la aumentan). Para los futuros pacientes de rabia a los que se aplique el protocolo de Milwaukee hemos desarrollado un método para la detección y el tratamiento de la deficiencia de biopterina.

El futuro de la investigación

En el primer aniversario de su diagnóstico de rabia, Jeanna asistió en Canadá a un congreso científico internacional sobre la rabia en calidad de invitada de honor en la cena de gala, en la que pronunció un discurso. Volvió a reunirse con sus compañeros de clase, sacó unas notas excelentes y obtuvo el carné de conducir. Las únicas secuelas de la rabia que perduran son una pequeña región insensible en el dedo mordido, una alteración del tono muscular del brazo izquierdo y una mayor amplitud de movimientos a la hora de correr. Este año acaban sus estudios secundarios. Piensa ingresar en veterinaria.

Pero, ¿puede el protocolo de Milwaukee salvar otras vidas? En los últimos dos años el tratamiento se ha aplicado seis veces sin éxito, en Alemania, India, Tailandia y los Estados Unidos. Por desgracia, varios de esos intentos violaron algunas de las hipótesis fundamentales del protocolo o no utilizaron la mayoría de los medicamentos indicados en el tratamiento. La comunidad médica se ha mostrado reticente a repetir nuestra terapia; algunos expertos se oponen públicamente a ella. Esa resistencia es comprensible, pues la supervivencia de Jeanna parece contradecir los estudios de laboratorio que demuestran que el virus de la rabia mata a las células del cerebro. Sin embargo, esos estudios pueden generar confusión, ya que las cepas de la rabia que se utilizan en el laboratorio pueden ser más propensas a causar la muerte celular que los virus que circulan en la naturaleza.

Otros expertos atribuyen la supervivencia de la niña al carácter insólitamente débil de la variante vírica de la infección. Es difícil rebatirlo, porque no extrajimos muestras del virus del cuerpo de Jeanna. (Se extrajeron anticuerpos específicos contra la rabia, pero no el propio patógeno, que es difícil de aislar.) Los análisis del virus de la rabia que portan los murciélagos indican que es distinto de la cepa procedente de perros: muestra mayor tendencia a multiplicarse en la piel que en el músculo. Ello no significa que el virus de los murciélagos sea menos letal que la versión canina.

Quizá la mejor forma de resolver esas cuestiones consista en aplicar nuestro tratamiento a animales rabiosos para determinar qué partes del protocolo (la inducción del coma, el tratamiento antivírico o el bloqueo de los receptores NMDA) resultan cruciales a la hora de luchar contra la rabia. Hemos solicitado a seis facultades de veterinaria que nos dejen llevar a cabo estos estudios, pero los responsables se muestran recelosos ante la idea de tratar animales rabiosos en sus unidades de cuidados intensivos. La ausencia de una investigación continuada supone una grave pérdida, pues no sabremos si nuestra estrategia resulta eficaz hasta que otros lo intenten. Si se repite nuestro éxito, podrá determinarse de forma sistemática qué fármacos resultan eficaces, en qué dosis y si la biopterina acorta de forma significativa la convalecencia. Además, debe abaratarse el coste del tratamiento y la rehabilitación (que ascendió por lo menos a 800.000 dólares en el caso de Jeanna) para convertirlo en una opción factible en los países en vías de desarrollo, donde la prevalencia de la rabia es mayor. Sería demasiado esperar que la rabia pasara de ser cien por cien fatal a cien por cien curable. Con todo, tenemos la oportunidad de aumentar las probabilidades de éxito.



RECUPERACION ASOMBROSA: Jeanna Giese (*en la foto, junto al autor*) acabará este año sus estudios de secundaria. Se propone entrar en la facultad de veterinaria. Las únicas secuelas que persisten tras su lucha contra la rabia son una pequeña región insensible en el dedo mordido, una alteración del tono muscular del brazo izquierdo y una mayor amplitud de movimientos a la hora de correr.

RICK WOOD *MCT/KRT*

El autor

Rodney E. Willoughby Jr., especialista en enfermedades infecciosas pediátricas del Hospital Infantil de Wisconsin, enseña pediatría en la universidad del estado. Centra su investigación en la rabia, la parálisis cerebral y la aplicación de antibióticos y probióticos en la minimización de las infecciones hospitalarias.

Bibliografía complementaria

INHIBITION OF RABIES VIRUS TRANSCRIPTION IN RAT CORTICAL NEURONS WITH THE DISSOCIATIVE ANESTHETIC KETAMINE. B. P. Lockhart, N. Tordo y H. Tsiang en *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, vol. 36, n.º 8, págs. 1750–1755; agosto de 1992.

PROPHYLAXIS AGAINST RABIES. C. E. Rupprecht y R. V. Gibbons en *New England Journal of Medicine*, vol. 351, n.º 25, págs. 2626–2635; 16 de diciembre de 2004.

SURVIVAL AFTER TREATMENT OF RABIES WITH INDUCTION OF COMA. R. E. Willoughby, Jr., K. S. Tieves, G. M. Hoffman, N. S. Ghanayem, C. M. Amlie-Lefond, M. J. Schwabe y col. en *New England Journal of Medicine,* vol. 352, n.º 24, páginas 2508–2514; 16 de junio de 2005.

La fragancia de las plantas

Lo que percibimos como un olor fragante constituye en realidad una refinada herramienta que utilizan las plantas para atraer polinizadores, disuadir a microorganismos y ahuyentar a los depredadores

Eran Pichersky

Los olores tienen la virtualidad de transportarnos a situaciones profundamente asentadas en nuestra memoria. El leve perfume de una planta nos trae a la mente experiencias de la infancia; evoca un sentido del tiempo y del espacio con mayor intensidad que cualquier otro estímulo. Nuestros antepasados conocían la capacidad de determinados olores de despertar emociones. Se mencionan algunos ejemplos en los textos religiosos: el Libro egipcio de los Muertos, los Vedas hindúes y la Biblia judeocristiana, entre otros. Y se emplean todavía sustancias aromáticas, sobre todo de origen vegetal, en ritos, perfumes, cosméticos y remedios caseros.

Una esencia vegetal se compone de algunos de los miles de metabolitos de la planta. Su fragancia se debe a moléculas orgánicas con una presión de vapor elevada. Esa propiedad física significa que, aunque un componente de la esencia se encuentre en forma líquida o sólida (la mayoría de las veces disuelto en el líquido intracelular), a las temperaturas normales del crecimiento de la planta, el componente en cuestión se evapora con facilidad al exponerse al aire.

Las sustancias químicas dotadas de esa propiedad se denominan compuestos volátiles. El perfume de una flor constituye un ejemplo clásico de compuesto volátil. Las fragancias vegetales se desprenden también de la hierba recién cortada, de las plantas medicinales o de las agujas de los pinos.

Los compuestos volátiles vegetales se adquirieron en el curso de la evolución para repeler a los herbívoros. En la actualidad, desempeñan múltiples funciones. La mayoría de los animales que interaccionan con las plantas son insectos, nada extraño, a tenor de su abundancia. Detectan las sustancias volátiles a través de sus antenas o cabezas y, en algunas especies, mediante los palpos maxilares, unos apéndices bucales.

En la superficie de las antenas de los insectos encontramos células especializadas; cada una contiene un tipo de receptor proteínico, que reconoce y fija compuestos volátiles específicos. El conjunto de células provistas de receptores transmite la información al cerebro, a través del sistema nervioso. Aunque cada



ARLENE G. RIPLEY/*American Scientist*

1. LAS FLORES DE CRISANTEMO atraen y combaten a los insectos con diversas sustancias olorosas. Esta mariposa azul (*Celastrina ladon neglecta*) se ha posado en la planta tras seguir el aroma de sus flores y obtener la recompensa del néctar. Sin embargo, los crisantemos producen también piretrinas (una clase de insecticidas volátiles) para ahuyentar a los insectos herbívoros que albergan intenciones más rapaces.

célula contiene un solo tipo de receptor, un compuesto particular puede ser reconocido (en mayor o menor grado) por más de un receptor. Por tanto, la pauta de excitación neuronal que provoca un determinado compuesto o mezcla es única. Además, ese sistema muestra una sensibilidad exquisita; hay receptores que detectan una sustancia volátil en el aire a concentraciones de unas pocas partes por mil millones.

Esencias y especias

A diferencia de "volátil", que es un término físico, el "perfume" nos remite al sujeto que lo detecta. Los humanos percibimos numerosas sustancias volátiles, aunque no todas las existentes; somos incapaces de oler el agua, a pesar de su omnipresencia. Nuestro sistema olfatorio presenta distintos intervalos de sensibilidad respecto a diversas sustancias químicas; las diferencias genéticas hacen que algunas personas detecten con mayor facilidad ciertos compuestos.

De los colores y las sensaciones táctiles se distinguen los olores por cuanto carecen de términos específicos para designar olores. Los clasificamos a partir de la experiencia subjetiva. Si una persona afirma que determinada sustancia huele a limón, a otra le recuerda el olor del jabón. En general, las asociaciones emocionales están influidas por el contexto de nuestros contactos con los olores. Los recuerdos olfatorios tienden a ser persistentes y muy vívidos.

En los mamíferos —humanos incluidos—, la sensación de olor se produce cuando los compuestos volátiles atraviesan las fosas nasales y alcanzan un órgano situado en el fondo de la nariz (u hocico), el *epitelio olfatorio*. Si bien la anatomía macroscópica del epitelio olfatorio difiere de la morfología de las antenas de los insectos, ambos órganos guardan semejanza desde el punto de vista celular. Al igual que las antenas, el epitelio olfatorio alberga neuronas provistas de receptores que fijan mo-

léculas específicas. Y, debido a que un mismo compuesto lo identifican, en mayor o menor grado, distintos receptores, el patrón complejo de la actividad neuronal transmite al cerebro información cualitativa y cuantitativa.

Las sustancias volátiles también llegan al epitelio olfatorio de forma indirecta, a través de la boca. Cuando se mastica la comida, ésta se mezcla con la saliva y se calienta; los compuestos volátiles del alimento se evaporan y ascienden por la vía retronasal. El reconocimiento de dichos aromas es instantáneo; confiere a cada alimento su sabor peculiar. De hecho, la lengua percibe sólo cinco sabores básicos (dulce, ácido, salado, amargo y el recién descrito umami), mientras que el número de mezclas aromáticas diríase que es ilimitado.

Aunque en general consideramos agradables los olores de las plantas, numerosos compuestos volátiles vegetales son tóxicos cuando se ingieren. Las plantas utilizan esas sustancias para proteger los órganos expuestos al ataque de microorganismos (frutos ricos en azúcar, por ejemplo). Esos agentes antimicrobianos se conocen desde la antigüedad; se empleaban para retrasar el deterioro de los alimentos. Por botón de muestra: el clavo, especia cuyo principal ingrediente activo es el eugenol, se añadía a los alimentos cocinados y a las carnes preparadas para evitar la proliferación de moho.

En realidad, antes del desarrollo de las técnicas modernas para la conservación de alimentos, los europeos dependían del clavo y otras especias tropicales para asegurar una provisión duradera de comida, sobre todo durante los meses de invierno. Un gran número de esas especias se importaban de Asia, lo que las convertía en bienes caros. La posibilidad de obtener ganancias fue una de las razones principales por las que Colón y otros exploradores buscaron una ruta más corta hacia las Indias Orientales. De hecho, puede afirmarse que las especias (compuestos volátiles vegetales) constituyeron una de las motivaciones fundamentales del descubrimiento del Nuevo Mundo.

Si las especias son tóxicas para los microorganismos y los insectos, ¿lo son también para las personas? Sí. Pero la toxicidad depende de la dosis, es decir, la cantidad de compuesto ingerido en relación con el peso corporal. Algunos expertos piensan que las mujeres encintas tienden a rechazar los alimentos especiados durante las primeras fases de la gestación (mediante las náuseas y los vómitos típicos del embarazo) para proteger al embrión frente a los compuestos

3 AL CEREBRO
BULBO OLFATORIO
2 AL BULBO OLFATORIO
1 OLOR
NEURONAS OLFATORIAS PROVISTAS DE RECEPTORES
1 OLOR
2 AL LOBULO ANTENAL
3 AL CUERPO PEDUNCULADO
LOBULO ANTENAL

2. HUMANOS E INSECTOS detectan los olores de forma análoga. En las personas, las moléculas responsables del olor entran en los senos paranasales a través de las ventanas nasales o la parte posterior de la garganta. En la parte superior de los senos, las células nerviosas provistas de receptores fijan los compuestos olorosos. Cada célula aloja un tipo de receptor; cuando éste se une a su molécula diana, la neurona transmite un mensaje a una parte cercana del cerebro, el bulbo olfatorio, donde se descifran las señales. En los insectos, las moléculas del olor penetran en agujeros diminutos presentes en cada uno de los pelos de las antenas. Cada pelo consta de ramificaciones finas con numerosas células nerviosas; de modo parecido al sistema de los mamíferos, cada célula exhibe una sola variedad de receptor. Cuando la molécula olorosa es detectada por un receptor, las señales se transfieren hacia las células nerviosas y luego al lóbulo antenal, una parte del cerebro del insecto que se aloja en la base del pedúnculo.

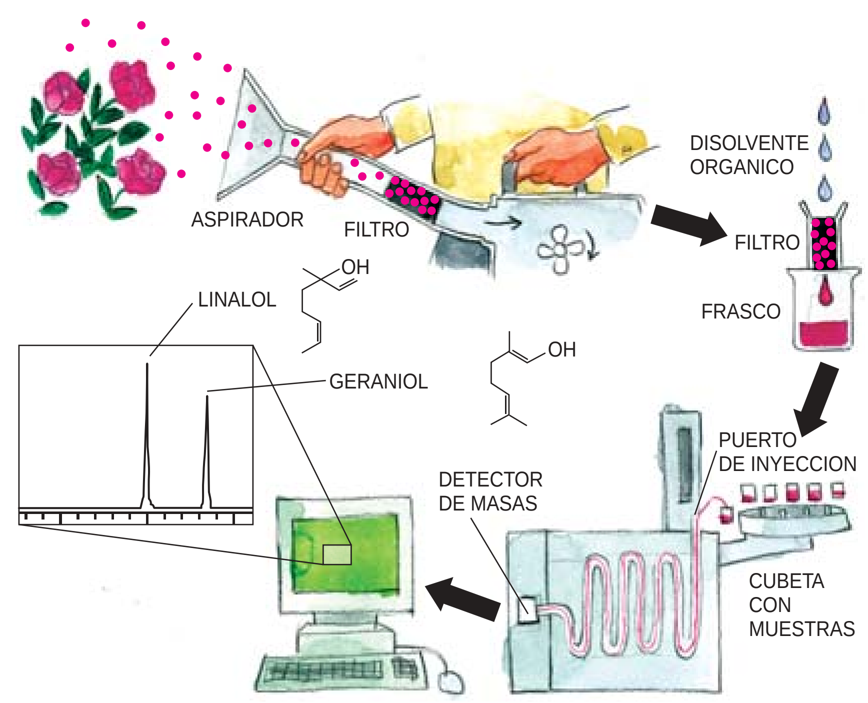
TOM DUNNE/*American Scientist*

que podrían causar deformidades o el aborto.

En el pasado, la necesidad de consumir alimentos condimentados estaba justificada. En la actualidad, las técnicas de refrigeración y conservación de alimentos han reducido al mínimo el riesgo de deterioro de la comida. Aun así, muchas personas muestran todavía predilección por los sabores picantes. La razón de esa tendencia no está clara; quizá los individuos que reconocían y degustaban la comida salpicada de especias lograran una ventaja selectiva al reducir el riesgo de enfermedades e intoxicaciones de origen alimentario. Hemos aprendido a sazonar la comida en su punto justo: los condimentos se añaden en cantidades que impiden la proliferación de microorganismos, a la vez que proporcionan un sabor picante agradable.

La medición del olor

Los sistemas biológicos para la detección del olor dependen de los receptores que existen para cada compuesto. El sistema olfatorio de cada especie es específico de su



3. LOS COMPUESTOS VOLATILES se analizan en un cromatógrafo de gases acoplado a un espectrómetro de masas. Las emisiones olorosas de la muestra vegetal se recogen con un filtro mediante la aspiración del aire que rodea la planta. Las sustancias atrapadas en el filtro se arrastran mediante un disolvente, en general hexano o pentano. Parte de esa disolución se inyecta en el cromatógrafo, donde se vaporiza instantáneamente antes de desplazarse a través del serpentín de separación. En el otro extremo de la columna, un espectrómetro de masas determina la masa y la composición química de cada compuesto emergente. En la figura se muestran el linalol y el geraniol, dos ingredientes de los perfumes florales.





4. ALGUNAS PLANTAS UTILIZAN EL PERFUME para manipular la conducta del insecto. Un ejemplo extremo es el perfume de la orquídea abejera (*Ophrys scolopax*), que guarda semejanza con las feromonas sexuales femeninas de la abeja solitaria *Eucera longicormis*. La forma y el color de las flores de la orquídea favorecen el mimetismo olfatorio. Se incita la copulación de las abejas macho con la planta; los insectos acaban empapados en polen. Engañados, vuelan hacia otro encuentro, esparciendo los gametos de la orquídea con cada nuevo intento. Parece que a las abejas fracasadas no les perjudica esa ironía de la naturaleza, pues promueven la reproducción de la flor a costa de su propio esfuerzo.

TOM DUNNE (*arriba*); CLAUDE NURIDSANY Y MARIE PERENNOU/PhotoResearchers, Inc./*American Scientist*



5. ALGUNAS PLANTAS SE DEFIENDEN, cuando son atacadas, mediante la producción de una savia pegajosa. La secreción de fuerte olor se compone de monoterpenos y sesquiterpenos tóxicos y volátiles; contiene también diterpenos parecidos al pegamento, que atrapan y engullen a los herbívoros incautos. Muchas de las muestras fósiles de resina endurecida (ámbar) encierran los restos de fitófagos allí atrapados hace millones de años. Esta muestra de ámbar dominicano contiene un gorgojo.

GEORGE POINAR/*American Scientist*

entorno particular. Los científicos se sirven de instrumentos para determinar el olor de forma objetiva, general y cuantitativa. El principal, el cromatógrafo de gases: un tubo de separación estrecho y largo, o columna, recubierto en su interior por distintas sustancias.

Antes de analizar un aroma, es necesario capturar el compuesto o la mezcla de compuestos volátiles que emanan de la planta. Las muestras se recogen mediante el bombeo del aire que rodea la planta a través de un filtro que retiene los compuestos orgánicos volátiles. Estos se extraen del filtro con un disolvente orgánico (hexano o pentano). El mismo tipo de disolventes se utiliza también para extraer directamente del tejido vegetal otros compuestos volátiles.

Una parte de la solución que contiene las sustancias volátiles se sitúa en la abertura del cromatógrafo de gases, que persiste a una temperatura elevada, suficiente para que la muestra se vaporice al instante. A través de la columna se bombea un gas inerte (helio, por ejemplo), que arrastra las sustancias volátiles. Cada componente presenta una afinidad distinta por los materiales que revisten la superficie interna del tubo, de forma que su movimiento se retrasa en diferente medida; así, cada compuesto emerge de la columna en un momento distinto.

En la salida del cromatógrafo se sitúa un detector de masas, que registra la elución de los analitos recién separados. Ese tipo de análisis suele combinarse con el empleo de un espectrómetro de masas, que no sólo determina la masa del compuesto que emerge del cromatógrafo, sino que identifica también su composición química. El análisis de las sustancias volátiles mediante la combinación de la cromatografía de gases y la espectrometría de masas no siempre alcanza el nivel de detección de los sistemas biológicos (los empleados por insectos y otros animales). Sin embargo, ofrece una sensibilidad notable y, sin lugar a dudas, una mayor uniformidad.

Función de la fragancia floral

¿Quién no se ha deleitado nunca con la fragancia de una flor? Muchos lectores habrán oído hablar de la función del olor floral en la atracción de los polinizadores. Una idea tan extendida cuan escasamente demostrada. No todas las flores se polinizan con la intervención de agentes biológicos —muchas especies herbáceas las poliniza el viento—, pero ello no significa que las flores de estas plantas no emitan compuestos volátiles.

Las plantas desprenden siempre moléculas orgánicas, aunque el olfato humano no las aprecie. Por lo que respecta a los perfumes florales que sí percibimos, los que atraen a polillas y mariposas suelen oler a "dulce"; los que atraen a ciertas moscas nos recuerdan el olor a "podrido". Sin embargo, en la mayoría de los casos se desconocen los efectos de los compuestos individuales sobre la respuesta de los polinizadores, sean o no los que se pretende atraer. ¿Qué sustancia química decide al polinizador para que visite la flor? ¿Existen compuestos con efectos repelentes? Se ha propuesto la hipótesis de que algunas sustancias volátiles provocan el rechazo de determinadas especies de insectos no deseadas o una vez realizada la polinización.

Los experimentos con flores artificiales que combinan olores con cierta cantidad de azúcar demuestran que los insectos aprenden a asociar fragancia y recompensa. Los entomólogos partidarios de esa capacidad de aprendizaje sostienen que, aunque los insectos puedan presentar preferencias innatas respecto a determinados compuestos volátiles, a lo largo de su vida responderán a cuantas señales de una flor les atraiga. En ese sentido, los olores florales complejos proporcionan una información que permite a los insectos discriminar entre tipos de flores y decidir cuál visitar.

Esa interpretación podría minar la tesis de la capacidad coercitiva de las plantas en su proceso evolutivo dependiente de otros seres vivos. Hallamos un ejemplo extremo de la manipulación de la conducta de los insectos por las plantas en el perfume de la orquídea del género *Ophrys*, que guarda semejanza con las feromonas sexuales femeninas de ciertas especies de abejas solitarias. Las abejas macho detectan ese olor (una mezcla de derivados de ácidos grasos) en el aire; se posan sobre las flores, cuya forma y color también recuerdan las de la abeja hembra. Exhiben entonces la conducta copulatoria, que no se aprecia en ausencia de perfume. Quedan empapados de polen. Al volar de una planta a otra en busca de las hembras esquivas, las abejas macho contribuyen a la polinización de las flores. Aunque ese sistema no parece ofrecer ninguna ventaja al insecto, el engaño se mantiene.

Tallos, raíces y hojas

Se conoce muy bien la liberación de sustancias volátiles desde las partes vegetativas de la planta (hojas, tallo o raíces). Pero hasta hace poco se ignoraban las funciones fisiológicas de tales compuestos, por lo demás apenas estudiados. Cuando el tronco de un pino sufre una agresión (la labor insidiosa de un escarabajo), el árbol exuda una resina de olor penetrante. La resina se compone de terpenos, hidrocarburos con una estructura básica de 10, 15 o 20 átomos de carbono que puede contener también átomos de oxígeno. Los terpenos más pesados, los de 20 átomos de carbono (diterpenos), se asemejan al pegamento; inmovilizan a los insectos en cuanto se introducen en el agujero horadado. Se trata de un mecanismo de defensa tan antiguo cuan eficaz: un número abundante de muestras de resina fósil (ámbar) contienen restos de insectos atrapados en su interior.

Los sesquiterpenos, de 15 carbonos, y los monoterpenos, de 10, más ligeros que los triterpenos, son volátiles y tóxicos. Algunos terpenos de resinas se sintetizan en el árbol antes de producirse un ataque; se almacenan en los conductos resiníferos. Pero el grupo liderado por Rod Croteau, de la Universidad estatal de Washington, ha descubierto que, cuando el árbol sufre una agresión, acelera la síntesis de tales sustancias defensivas; algunos compuestos específicos se fabrican en concentraciones muy elevadas. Seguimos sin saber si los terpenos de marras operan como toxinas frente a los insectos invasores o si su dispersión a la atmósfera desempeña otras funciones.

Abundan las plantas que desprenden compuestos volátiles cuando son atacadas. En algunos casos, las señales emitidas operan a modo de arma defensiva. Por ejemplo, el (Z)-3-hexenil-acetato, compuesto volátil de las hojas verdes que emiten numerosas plantas agredidas, disuade a las hembras de la polilla de *Heliothis virescens* para que no pongan los huevos sobre las plantas de tabaco atacadas. Adviértase que la tipología de los compuestos volátiles que emite la planta de tabaco varía entre la noche y el día: la mezcla nocturna, rica en ésteres (Z)-3-hexen-1-ol, es la más eficaz a la hora de repeler las polillas de *H. virescens*, activas durante la noche.

Las investigaciones pioneras de los equipos dirigidos por Marcel Dicke, de la Universidad holandesa de Wageningen, Jim Tumlinson, del Departamento estadounidense de Agricultura y la Universidad estatal de Pennsylvania, y de otros grupos han puesto de manifiesto que las sustancias volátiles que libera la planta en presencia de herbívoros operan a modo de defensas indirectas. De tal estrategia se sirven, por botón de muestra, el maíz, las legumbres y la especie modelo *Arabidopsis thaliana*. Las plantas no sólo emiten compuestos volátiles de forma inmediata allí donde las atacan orugas, ácaros, pulgones o insectos similares; lo hacen también de una manera general en las partes no dañadas. Esas señales atraen a insectos depredadores de fitófagos.

Hay avispas parasitarias que detectan los compuestos volátiles emitidos por una planta atacada y ponen sus huevos dentro de la oruga agresora; con el tiempo, los huevos de avispa eclosionan y las larvas emergentes se alimentan de la oruga desde su interior. De ese modo, el crecimiento de las orugas infectadas se ve retrasado, lo que beneficia a la planta. De forma similar, las sustancias volátiles que desprenden las plantas como reacción ante la puesta de huevos de los herbívoros atraen a los parásitos de dichos huevos, con lo que se evita su eclosión y el ataque de los herbívoros hambrientos que surgirían de los mismos.

La reciente identificación de unos compuestos específicos de la secreción bucal de herbívoros lepidópteros ha arrojado luz sobre el mecanismo molecular que subyace bajo la respuesta defensiva de la planta. Una de esas sustancias es la volicitina. Se ha aislado de larvas de gardama o rosquilla verde (*Spodoptera exigua*), que se alimentan del maíz. Se trata de la N-(17-hidroxilinolenoil)-L-glutamina y actúa en las células vegetales mediante la activación de los genes involucrados en la biosíntesis de compuestos tóxicos de indol y sesquiterpenos. En otras larvas de mariposas y polillas se han encontrado otros conjugados de ácidos grasos con efectos similares sobre la expresión génica de la planta.

Los compuestos volátiles vegetales pueden utilizarse a modo de moneda de cambio en ciertas estrategias defensivas indirectas. En el árbol *Leonardoxa africana*, del sotobosque de la pluviselva, las hormigas de la especie *Petalomyrmex phylax* patrullan en las hojas jóvenes; atacan a cualquier insecto herbívoro con el que se encuentren. Las hojas jóvenes emiten elevadas concentraciones de metilsalicilato (ingrediente principal del aceite de gaulteria), un compuesto volátil que utilizan las hormigas como feromona o como un antiséptico en sus nidos. Parece que el



KENNETH H. THOMAS/*PhotoResearchers, Inc./American Scientist*

6. LA CONTIENDA ENTRE LOS INSECTOS HERBIVOROS y su fuente de alimentación es despiadada. Este gusano del tabaco (*Manduca sexta*) se encuentra al término de su vida tras ser consumido desde su interior por larvas de avispa bracónida. Las avispas parasitarias responden a los compuestos volátiles que emite la planta atacada; ponen sus huevos en el interior de la oruga agresora. Cuando los huevos eclosionan, las larvas de avispa consumen de forma gradual al huésped; con el tiempo, cubren con sus capullos blancos, como granos de arroz, la superficie del gusano todavía vivo. Los múltiples capullos vacíos sobre el cadáver macabro revelan que la mayoría de las pupas se han transformado ya en avispas adultas.

metilsalicilato constituye a la vez un atrayente y una recompensa que ofrece el árbol para que las hormigas desempeñen su función disuasoria, tan beneficiosa para el vegetal.

Las plantas emiten también compuestos volátiles a través de las raíces. La hierba bruja (*Striga*) y otras parasitarias desarrollan sus propias raíces en la dirección seguida por la raíz del huésped; para ello recorren el rastro de los compuestos volátiles que éste libera (sesquiterpenos). Un estudio reciente demostró que las raíces de *Arabidopsis* segregan el monoterpeno 1,8-cineol. Sin embargo, se desconoce si dichas señales se propagan en forma de sustancia volátil (a través del aire del interior del suelo) o de soluto (en disolución).

Conforme se han ido acumulando pruebas sobre la función defensiva, directa e indirecta, de los compuestos volátiles de las partes vegetativas, han empezado a emerger cuestiones sobre su origen evolutivo y su ventaja actual para la planta. Cualesquiera que sean los motivos originales de la emisión general o inducida de sustancias volátiles, ese mecanismo proporciona copiosa información a organismos muy dispares. Resulta evidente que algunos insectos identifican ciertas plantas por las sustancias que emiten; las detectan incluso desde lejos o en la oscuridad.

Por otro lado, si la liberación de compuestos volátiles específicos ha determinado una estrecha asociación con la agresión del herbívoro en el curso de la evolución, podría la señal desempeñar varias funciones. La emisión indicaría a los depredadores herbívoros la ubicación de la presa; podría servir para avisar a otros fitófagos sobre la presencia de competidores y enemigos; podría alertar sobre la baja calidad del alimento causada por la inducción de las defensas directas de la planta, como la producción de toxinas no volátiles. La liberación de compuestos volátiles permitiría que las plantas vecinas conocieran la naturaleza y el momento de un ataque herbívoro cercano.

Esta red de interacciones puede adquirir una complejidad tal, que resulta imposible predecir cuáles serán las consecuencias finales para una planta concreta. Con todo, las plantas siguen emitiendo compuestos volátiles. Es posible que en esa carrera armamentística las plantas se vean atrapadas en su propia respuesta fisiológica (la emisión de compuestos volátiles), manipulada constantemente por ciertos insectos en detrimento de la planta. Pero resulta evidente que esa respuesta tiene un propósito defensivo, pues numerosos experimentos han demostrado que la desactivación del sistema de emisión de compuestos volátiles de una planta aumenta la vulnerabilidad de la misma ante el ataque de herbívoros.

Síntesis de compuestos volátiles

Aunque la estructura química de numerosos compuestos volátiles se identificó hace años, se tardó mucho en avanzar en el conocimientos de su mecanismo de síntesis. Una de las razones principales de ese retraso estriba en la baja concentración de las enzimas implicadas; dado que los compuestos volátiles se fabrican en cantidades reducidas, las enzimas que intervienen en la síntesis están presentes en cantidades mínimas, lo que dificulta su identificación, aislamiento y caracterización.

Ahora bien, con el progreso de las técnicas bioquímicas y biomoleculares, sobre todo en el aislamiento de genes de plantas y en la producción de proteínas vegetales a gran escala, se han dado pasos importantes. Por fin, se han identificado y caracterizado varias rutas responsables de las síntesis de los compuestos volátiles, con la inclusión de numerosas enzimas catalíticas. Esos resultados han permitido ir aclarando misterios persistentes.

Algunos compuestos volátiles los comparten la mayoría de las especies. Otros se hallan sólo en una o pocas plantas. Con frecuencia, incluso las especies estrechamente emparentadas que divergieron de un antepasado común hace escasos millones de años desprenden fragancias distintas. Ante esa diversificación, y tomando en cuenta que las enzimas responsables están codificadas por genes, ¿cómo han podido aparecer semejantes diferencias en un intervalo de tiempo tan breve? Las pruebas genéticas indican que los mecanismos de esa evolución, aunque diversos, siguen unos principios básicos.

7. ALGUNAS ESPECIES VEGETALES ESTRECHAMENTE EMPARENTADAS exhiben diferencias notables en la producción de olor. En *Clarkia breweri*, la enzima linalol sintasa se encuentra en los pétalos y el estigma de las flores, que son perfumadas. Por el contrario, en *Clarkia concinna* la cantidad de esa enzima en los pétalos es nula, escasa en el estigma. La flor no desprende una fragancia perceptible, debido a modificaciones génicas sutiles. El gen de la linalol sintasa es casi idéntico en ambas especies, pero no el promotor (región génica que determina el lugar, el momento y la cantidad de enzima sintetizada). En *C. concinna*, una parte del promotor que favorece la expresión del gen, la caja CAAT, está interrumpida por cuatro adeninas adicionales; se interpreta, pues, CAAAAAAT. Esa inserción impide que la caja CAAT funcione correctamente. Otras pequeñas discrepancias entre los promotores de *Clarkia* pueden contribuir también a la distinta expresión del gen, aunque se desconoce su función.



8. LOS COMPUESTOS SEGREGADOS POR FITOFAGOS activan los genes de la planta cuyos productos forman toxinas y atraen a los depredadores de insectos. Uno de esos compuestos salivales, la volicitina, procede de la gardama o rosquilla verde (*Spodoptera exigua*). En ausencia de esa sustancia, una agresión a la planta no provoca ninguna respuesta defensiva. En presencia de volicitina, en cambio, el ataque a la planta de maíz activa los genes de las enzimas que catalizan la síntesis de una mezcla de compuestos volátiles (entre ellos el indol, *centro*) que atraen a las avispas parasitarias, depredadoras de orugas (*derecha*).

La causa más simple de la diversificación entre especies vegetales emparentadas, en cuanto a la producción de compuestos volátiles, radica en las diferencias de expresión de un mismo gen. Sean por caso las flores de *Clarkia breweri*, una planta anual del litoral californiano, que sintetiza y emite (en cantidades detectables) un monoterpeno, el linalol. El gen que codifica la enzima linalol sintasa se activa en los pétalos y el estigma, en el mismo instante en que se abren las flores; el linalol se sintetiza en esas partes de la flor. En *Clarkia concinna*, especie estrechamente emparentada con la anterior, el mismo gen se expresa a concentraciones ínfimas en el estigma; en los pétalos, está ausente. Así pues, la planta sintetiza menor cantidad de enzima y, por tanto, de linalol, con lo que las flores de *C. concinna* no emiten el monoterpeno.

Las alteraciones génicas originan proteínas con una actividad ligeramente distinta entre especies emparentadas: las flores de *C. breweri* emiten metilsalicilato, mientras que las flores de *Antirrhinum* sp. sueltan metilbenzoato. Mediante la incorporación de grupos metilo en precursores similares (ácido salicílico en *Clarkia* y ácido benzoico en *Antirrhinum*) se obtienen ambos compuestos. Las enzimas que catalizan esas reacciones se denominan metiltransferasas; su secuencia aminoacídica y estructura tridimensional se parecen tanto, que deben haber evolucionado a partir de un antepasado común. En el tiempo transcurrido desde la divergencia de las líneas de *Clarkia* y de *Antirrhinum*, las dos metiltransferasas acumularon mutaciones de tal suerte que sus centros catalíticos se ajustan ahora a compuestos distintos y producen, por tanto, sustancias volátiles diferentes.

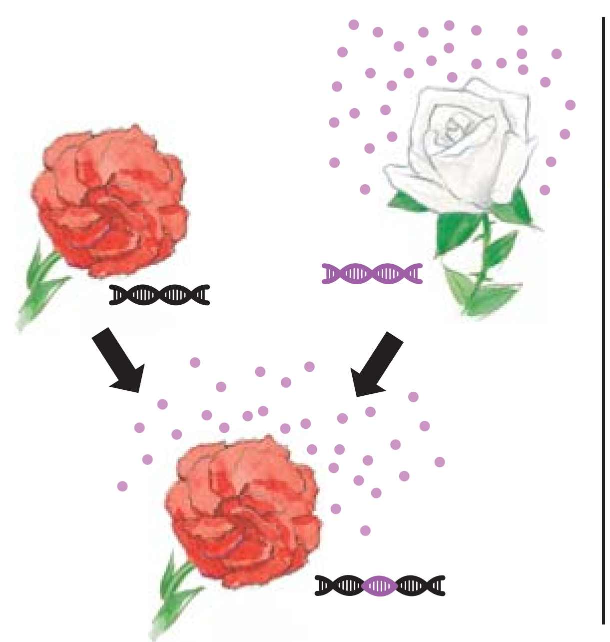
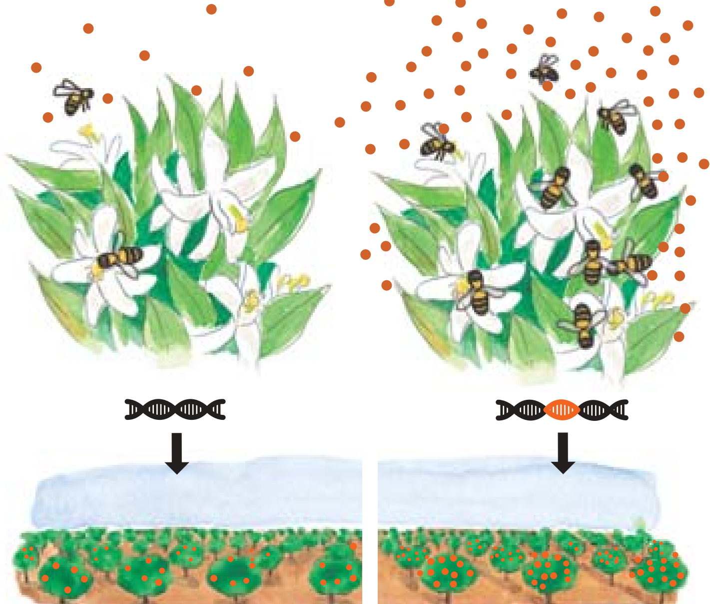
Algunas de las enzimas responsables de la síntesis de compuestos volátiles presentan una característica inusual: el centro activo aloja a más de un sustrato. La metiltransferasa de *Antirrhinum* opera sólo sobre el ácido benzoico; no obstante, una enzima similar de las flores de la planta tropical *Stephanotis floribunda* metila al ácido benzoico o al ácido salicílico, con lo que se produce metilbenzoato o metilsalicilato, respectivamente. Aunque la enzima es intrínsicamente más activa con el ácido salicílico, las flores producen y emiten más metilbenzoato porque la ruta global para la síntesis del ácido benzoico es más activa que la del ácido salicílico. En ese caso, la disponibilidad del sustrato determina la cantidad de producto obtenido.

A veces, las diferencias entre enzimas semejantes comportan la síntesis de productos distintos a partir del mismo compuesto inicial. En las flores de *C. breweri* la enzima linalol sintasa actúa sobre el geranil difosfato para producir linalol; una enzima parecida, en las hojas de albahaca, opera sobre el mismo sustrato para dar lugar al monoterpeno geraniol, un isómero del linalol con un olor muy distinto.

Existen proteínas emparentadas incluso en las células de una misma planta. Ciertas glándulas especiales de las hojas de la albahaca contienen geraniol sintasa para la producción de geraniol, además de linalol sintasa para la síntesis de linalol. Tan estrecho parecido arranca, en pasado lejano, del momento en que se produjo la duplicación de un gen. Andando el tiempo, las dos versiones génicas divergieron tanto, que terminaron por sintetizar enzimas distintas. Si ese proceso se repite una y otra vez, resultarán "familias de genes" que codificarán "familias de proteínas".

El descubrimiento de los genes de los olores no sigue un orden sistemático. Suele proceder conforme avanza la exploración de las vías de síntesis de compuestos volátiles específicos. El proceso de descubrimiento, sin embargo, cambia cuando se conocen todos los genes de una especie, como es el caso de *Arabidopsis* y del arroz.

TOM DUNNE/*American Scientist*

9. LA MANIPULACION GENETICA DE LAS ESENCIAS FLORALES se presenta prometedora para la industria de las plantas ornamentales y agrícolas. A lo largo de decenios de horticultura, las estirpes de flores se han seleccionado en razón de su apariencia, sin atender al perfume, lo que ha dado lugar al desarrollo de cultivares inodoros. Varios grupos de investigación están intentando corregir ese vacío mediante la transferencia de genes, como el que codifica la linalol sintasa, desde una especie fragante (la rosa blanca) hacia una especie que carece de dicha enzima (clavel rojo, *izquierda*). Se encuentra en juego una parte importante de un mercado global equivalente a unos 30.000 millones de euros. Experimentos similares con plantas agrícolas se proponen un objetivo más productivo: mejorar la polinización y, con ello, el rendimiento de los cultivos frutícolas (*derecha*).

TOM DUNNE/*American Scientist*

Merced a la disponibilidad de los datos genómicos, los investigadores aplican instrumentos bioinformáticos a la búsqueda de los genes codificadores de las proteínas, que aportan pruebas sobre la duplicación y divergencia génicas.

En el caso de *Arabidopsis*, el análisis de que hablamos indica que el genoma contiene alrededor de 30 genes que guardan semejanza con la linalol sintasa, la geraniol sintasa y otras terpeno sintasas. Algunos de esos genes codifican enzimas que catalizan la formación de monoterpenos (entre ellos el linalol, pero no el geraniol) y sesquiterpenos relacionados.

Una propiedad destacable de muchas de las enzimas de la familia de las terpeno sintasas —que no suele hallarse en las enzimas del metabolismo primario o secundario— es la capacidad de sintetizar numerosos productos a partir de un solo sustrato. Una enzima de *Arabidopsis* cataliza la formación de diez monoterpenos a partir del mismo precursor geranil pirofosfato. La enzima fabrica tal variedad de compuestos porque produce un *carbocatión*, un intermediario inestable que se transforma luego en un producto final estable a través de mecanismos distintos. El proceso está controlado por la topología del centro activo enzimático, que es donde tiene lugar la conversión. Pero al tratarse de un fenómeno en buena parte estocástico, un porcentaje de los procesos catalíticos da lugar a un producto final, otro porcentaje origina un segundo producto, y así sucesivamente. El resultado corresponde a una mezcla de monoterpenos que exhibe siempre la misma proporción entre sus componentes.

La estrategia de crear múltiples productos mediante una proteína catalizadora no sólo resulta valiosa por su bajo coste. Ofrece otra ventaja de suma importancia: la capacidad de transmitir, mediante la herencia de un gen, los medios para sintetizar en un momento dado una señal compleja y fácilmente reconocible por los insectos polinizadores y, en otro momento, un arsenal complejo de toxinas contra patógenos y herbívoros.

Una paleta de olores

El perfume floral repercute en el rendimiento económico de cultivos y plantaciones que dependen de insectos polinizadores. Las abejas polinizan el cerezo, manzano, albaricoquero y melocotonero, así como algunas hortalizas y plantas tropicales (papaya). La polinización no influye sólo sobre la cosecha, sino también sobre su calidad y eficiencia de la producción. Numerosos cultivos (sobre todo manzanas, moras y sandías) requieren la fecundación de la mayoría de sus óvulos, si no de todos, para obtener una fruta de tamaño y forma óptimos. Una disminución en la emisión de fragancia floral reduce la atracción de polinizadores, con las consiguientes pérdidas para el agricultor.

El efecto reviste especial importancia en las especies introducidas que contaban con un polinizador especializado en su zona de origen. Ese problema se exacerbó hace algunos años en los EE.UU., a raíz de una epidemia que diezmó la población de abejas, el principal insecto polinizador en ese país.

Uno de los métodos con el que los fitomejoradores salvan el problema de la polinización se basa en el desarrollo de variedades autocompatibles, o *apomícticas*, que no requieran fecundación. Aunque esa solución resulta satisfactoria (a veces), entre sus inconvenientes se encuentran la elevada uniformidad genética y, como consecuencia, la

mayor exposición a los patógenos. Algunos agricultores se han esforzado en favorecer la atracción de las abejas mediante la pulverización de sustancias olorosas en los árboles frutales; sin embargo, tal estrategia resultó costosa, debió repetirse, tuvo efectos potencialmente tóxicos en el suelo y la biota local y, por último, se comprobó que era ineficaz.

La escasa eficacia de tal estrategia refleja las limitaciones intrínsecas de los compuestos artificiales aplicados de forma externa, que fracasan de plano en la transmisión del mensaje apropiado a las abejas. En este orden, la pulverización general de la mezcla volátil no indica a los insectos la ubicación exacta de las flores. Obviamente, se necesita una estrategia más refinada. Mediante la potenciación de un perfume floral ya existente, la obtención de uno nuevo o la modificación de sus propiedades —todo ello al alcance de la ingeniería genética— se manipularía el comportamiento de los insectos polinizadores y la frecuencia de sus visitas a las flores. Además, la modificación del metabolismo de la fragancia aumentaría la protección del cultivo frente a patógenos y plagas.

La manipulación genética del olor beneficiará también a la industria floricultora. Las flores cortadas, el follaje, las plantas en maceta y otras plantas ornamentales desempeñan un papel estético importante en nuestra sociedad. Aunque el cruzamiento tradicional ha producido cultivares que han mejorado la duración en jarrón, el transporte, el color y la forma de la planta, pasó por alto el perfume. La pérdida de olor entre las plantas ornamentales, que representan un valor de más de 30.000 millones de euros en todo el mundo, hace de ellas un objetivo importante para la manipulación genética de la fragancia floral.

Se han iniciado algunos trabajos en esa línea. Varios grupos han obtenido plantas de petunia y clavel que expresan el gen linalol sintasa procedente de *C. breweri*. Se trata de experimentos todavía preliminares. Por razones técnicas, el gen se expresó en todas las partes de la planta; aunque las plantas transgénicas sintetizaban pequeñas cantidades de linalol (que en condiciones normales no se produce ni en claveles ni en petunias), la concentración era inferior al umbral de detección del olfato humano. En experimentos semejantes con la planta de tabaco se utilizaron genes de otras monoterpeno sintasas, como la que produce limoneno (olor a limón), pero los resultados no fueron mejores.

Ya se ha puesto en marcha la siguiente generación de experimentos. Su objetivo: la expresión de genes de olores específicos de las flores u otros órganos, como las glándulas especiales que almacenan compuestos antimicrobianos o repelentes de herbívoros.

El autor

Eran Pichersky es profesor de biología molecular, celular y evolutiva en la Universidad de Michigan. Centra su investigación en la genética y la bioquímica de los compuestos volátiles vegetales. En los últimos años ha investigado en el Instituto Max Planck de Ecología Química en Jena. También ha impartido clases en la Universidad Hebrea de Jerusalén.

Bibliografía complementaria

MULTITROPHIC EFFECTS OF HERBIVORE-INDUCED PLANT VOLATILES IN AN EVOLUTIONARY CONTEXT. M. Dicke y J. J. A. van Loon en *Entomologia Experimentalis et Applicata*, vol. 97, págs. 237-249; 2000.

DEFENSIVE FUNCTION OF HERBIVORE-INDUCED PLANT VOLATILE EMISSIONS IN NATURE. A. Kessler y I. T. Baldwin en *Science*, vol. 291, págs. 2141-2144; 2001.

THE FORMATION AND FUNCTION OF PLANT VOLATILES: PERFUMES FOR POLLINATOR ATTRACTION AND DEFENSE. E. Pichersky y J. Gershenzon en *Current Opinion in Plant Biology*, vol. 5, págs. 237-243; 2002.

BIOCHEMISTRY OF PLANT VOLATILES. N. Dudareva, E. Pichersky y J. Gershenzon en *Plant Physiology*, vol. 135, págs. 1893-1902; 2004.


A TODO GAS
con
HID

ROGENO

Se estudian procedimientos para almacenar en vehículos de pilas de combustible el gas hidrógeno necesario para cubrir largas distancias

Sunita Satyapal,
John Petrovic
y George Thomas

En una tarde veraniega de 1783, Jacques Charles asombró a sus contemporáneos al despegar de París en un globo de sacos de seda engomada, inflado con un gas menos pesado que el aire, el hidrógeno. Subió hasta los mil metros de altura. El globo fue destruido, al aterrizar fuera de la ciudad, por aterrorizados campesinos que lo creyeron obra del diablo. Pero Charles había iniciado así la persecución de un deseo vigente aún, dos siglos más tarde: aprovechar para el transporte la energía del hidrógeno, el elemento más ligero del universo.

Por varias razones, el hidrógeno, sea mediante su combustión o en pilas, es una sugestiva opción para propulsar los futuros vehículos de automoción. Las industrias nacionales lo pueden obtener de toda una gama de piensos químicos y fuentes de energía (renovables, nucleares o fósiles). No es tóxico y aportaría energía apenas contaminante a máquinas de múltiples tipos. En su combustión no desprende dióxido de carbono, gas de invernadero. Una batería de pilas de combustible —artefacto semejante a la batería que genera electricidad a partir de hidrógeno y oxígeno— puede propulsar un vehículo eléctrico con agua y calor como únicos subproductos [*véase* “Automoción por pilas de combustible”, Steven Ashley; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 2005]; su rendimiento podría doblar con creces el que hoy se alcanza. El hidrógeno ayudaría así a mitigar acuciantes problemas del ambiente y la sociedad: la contaminación atmosférica que amenaza la salud, el cambio climático global y la dependencia de las importaciones de crudo.

1. EL GAS HIDROGENO resiste su confinamiento en el volumen de un depósito de gasolina normal.

KENN BROWN



2. EN LAS ESTACIONES DE HIDROGENO del futuro repostarán vehículos equipados con alguno de los sistemas de almacenamiento que hoy se están investigando.

KENN BROWN

La propulsión por hidrógeno tropieza, no obstante, con notables obstáculos. El kilogramo de hidrógeno contiene tres veces más energía que el de gasolina, pero hoy no es posible almacenar este gas con la compacidad y sencillez del tradicional combustible líquido. Uno de los mayores problemas técnicos que deben resolverse es el de almacenar a bordo de modo eficaz y seguro suficiente hidrógeno para satisfacer la autonomía y las prestaciones que exigen los conductores. Hay que hallar soluciones "ideales" que no desmerezcan en un aspecto cuando mejoran en otro. El depósito de combustible debe almacenar hidrógeno suficiente para una autonomía mínima que hoy sea aceptable —500 kilómetros— en un volumen que no restrinja el espacio de los pasajeros, ni del equipaje. El hidrógeno tendrá que emitirse al ritmo que exijan las aceleraciones en carretera y funcionar a temperaturas prácticas. El repostaje habrá de hacerse en pocos minutos y a precios competitivos. Sin lugar a dudas, las técnicas actuales de almacenamiento distan mucho de la situación ideal.

La industria de la automoción, los gobiernos e instituciones académicas de todo el mundo trabajan intensamente para superar estas limitaciones. El Acuerdo sobre Implantación del Hidrógeno, de la Agencia Internacional de la Energía, firmado en 1977, constituye hoy el mayor grupo internacional dedicado al estudio del almacenamiento del hidrógeno, con más de 35 investigadores de 13 países. La Asociación Internacional para la Economía del Hidrógeno, creada en 2003, consta de 17 gobiernos nacionales comprometidos en el desarrollo de técnicas del hidrógeno y pilas de combustible. En 2005, el Departamento de Energía de EE.UU. estableció un Proyecto Nacional de Almacenamiento de Hidrógeno, con tres centros modelo y numerosas contribuciones de la industria, la universidad y los laboratorios federales tanto en la investigación básica como en la aplicada. Sólo en el año pasado, este proyecto financió con más de 30 millones de dólares cerca de 80 trabajos de investigación.

Resumen/*Almacenamiento de hidrógeno*

- Uno de los mayores obstáculos ante los futuros vehículos de pilas de combustible estriba en el almacenamiento a bordo de hidrógeno en cantidad suficiente para la autonomía de 500 kilómetros que hoy se espera en un automóvil.
- La solución típica consiste en almacenar hidrógeno en estado gaseoso, a elevada presión y a temperatura ambiente en depósitos presurizados, pero éstos no admiten suficiente cantidad de gas. Los sistemas de hidrógeno líquido, que funcionan a temperaturas criogénicas, adolecen también de notables inconvenientes.
- Están en desarrollo varias técnicas de almacenamiento de alta densidad, pero ninguna satisface el objetivo todavía.

Barreras infraestructurales

Ante la plena adopción de los automóviles de pilas de hidrógeno se levanta una barrera evidente: la magnitud del problema. Ingente. Sólo en EE.UU. se consumen alrededor de 1450 millones de litros de gasolina al día (530.000 millones al año), casi dos tercios del consumo total de crudo en el país. En más de la mitad, ese petróleo procede del exterior. Se necesitarían enormes inversiones para reconvertir la industria de automoción nacional en producción de vehículos de pilas de combustible y la extensa red de refino y distribución de gasolina del país entero para que manipule hidrógeno en ingentes cantidades. Los propios vehículos de pilas de hidrógeno tendrían que abaratarse y competir en duración con los de la técnica actual, ofreciendo prestaciones equivalentes. También deberá tenerse en cuenta la seguridad, pues subsiste un rechazo público instintivo: todavía se recuerda la tragedia del dirigible *Hindenburg* en 1937 y se asocia con el hidrógeno, pese a las pruebas de que la cubierta inflamable de la aeronave fue un factor crucial en el incendio.

¿Por qué es tan difícil almacenar hidrógeno en un vehículo en cuantía suficiente? A la temperatura ambiente y presión atmosférica (una atmósfera es aproximadamente 1,03 kilogramos por centímetro cuadrado), el hidrógeno es un gas con una densidad de energía 3000 veces menor que la de la gasolina líquida. Un depósito de 75 litros lleno de gas hidrógeno a la presión atmosférica sólo haría avanzar unos 150 metros un coche normal. Cualquier sistema útil de depósito a bordo habrá de aumentar la densidad del hidrógeno almacenado.

La autonomía mínima de 500 kilómetros es uno de los principales objetivos de una iniciativa conjunta de la industria y el gobierno estadounidenses —la FreedomCAR and Fuel Partnership— dirigida al desarrollo de una



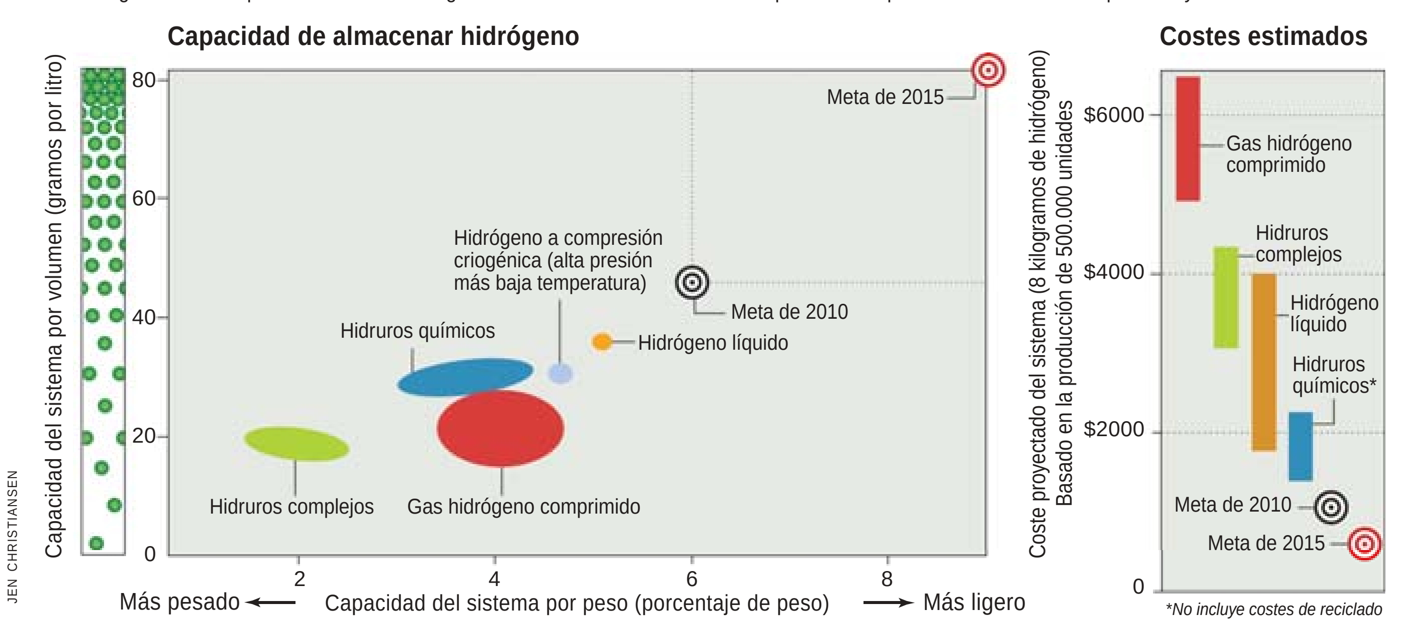
técnica avanzada para la automoción del futuro. Vale una regla práctica: un galón (3,785 litros) de gasolina equivale en energía a un kilogramo de hidrógeno. Frente a los automóviles actuales, que gastan como mucho 20 galones de gasolina en recorrer el mínimo de 500 kilómetros, un vehículo típico de pilas de combustible sólo consumiría en torno a ocho kilogramos de hidrógeno: su rendimiento funcional es mayor. Dependiendo del tipo y del tamaño del vehículo, unos modelos necesitarán más hidrógeno que otros para cubrir esa distancia. Las pruebas realizadas sobre 60 prototipos, de diversos fabricantes, propulsados por hidrógeno han demostrado hasta ahora autonomías de 160 a 300 kilómetros.

En busca de una meta que pudiera alcanzarse hacia 2010 (cuando se espera que salgan a la carretera los primeros coches de pilas de combustible en serie), se comparan las prestaciones de las diversas técnicas de almacenamiento con la referencia del "seis por ciento del peso". Es decir, que el sistema de almacenamiento contenga el 6 por ciento de su peso total en hidrógeno: si pesara 100 kilogramos (valor razonable para un vehículo), seis de esos kilogramos serían de hidrógeno almacenado. Aunque el porcentaje no parezca grande, conseguir tal nivel costará un enorme esfuerzo: hoy día apenas puede llegarse al 2 por ciento con materiales a presiones no muy altas. Por añadidura, mantener el

Las dificultades del almacenamiento

Un sistema de almacenamiento de hidrógeno debe transportar suficiente combustible para recorrer un mínimo de 500 kilómetros. Además, sus dimensiones y peso han de permitir que un coche pueda llevarlo. Es probable que hacia 2010 se satisfagan las necesidades de la primera generación de vehículos de pilas de combustible, con sistemas que almacenen una cantidad de hidrógeno igual al seis por ciento de su peso y 45 gramos por litro (*diana en negro de la primera gráfica*). Pero ninguna de las opciones actuales lo logra todavía.

Hacia 2015 se necesitarán aún mejores prestaciones para la mayor variedad de vehículos que habrá entonces. Adviértase que los valores señalados incluyen el equipo necesario para hacer funcionar cada sistema. El hidrógeno líquido en sí tiene una densidad de 71 gramos por litro, pero contando con el depósito y los componentes auxiliares la capacidad por volumen desciende hasta apenas 40 gramos por litro. El desarrollo de los adsorbentes de hidrógeno apenas acaba de arrancar; ni siquiera se dispone de datos sobre capacidad y coste.



HIDROGENO COMPRIMIDO

El gas comprimido se almacena en cilindros ligeros, aunque resistentes, semejantes a botellas de buceo, a presiones que van de 350 a 700 atmósferas.

DENSIDAD DE ALMACENAMIENTO



Hidrógeno



Pros	Contras	Estado
Peso bajo	Alto volumen; requiere alta presión de almacenamiento y repostar a menudo	Disponible

volumen total del sistema próximo al de un depósito normal de gasolina de automóvil será aún más difícil, puesto que la mayoría del espacio asignado lo ocuparán depósitos, válvulas, tuberías, reguladores, sensores, aislamientos y demás elementos necesarios para contener los seis kilogramos de hidrógeno. Por último, un sistema útil habrá de liberar hidrógeno a velocidad suficiente para que la combinación de pila de combustible y motor eléctrico entregue la potencia y aceleración que esperan los conductores.

Hidrógeno comprimido

En la actualidad, la mayoría de los prototipos movidos por pilas de combustible (hay varios centenares) almacenan el gas hidrógeno en cilindros de alta presión, semejantes a las botellas de buceo. Son tanques resistentes y ligeros, construidos en materiales compuestos ("composites") de fibra de carbono arrollada en filamentos, capaces de contener hidrógeno en condiciones seguras a presiones desde 350 hasta 700 atmósferas. Sin embargo, al elevar la presión, la densidad del hidrógeno no aumenta en igual proporción. A 700 atmósferas, la mejor densidad de energía alcanzable en los actuales depósitos de alta presión (39 gramos por litro) ronda sólo el 15 por ciento de la que ofrece la gasolina. Los cilindros de alta presión de hoy sólo pueden contener del 3,5 al 4,5 por ciento de su peso en hidrógeno. Ford presentó recientemente Edge, un prototipo de 4x4 "cruzado", es decir, monocasco y de suelo bajo: lo propulsa un sistema combinado de híbrido enchufable y pila de combustible, capaz de almacenar 4,5 kilogramos de hidrógeno combustible en un depósito a 350 atmósferas y alcanzar así una autonomía total de 320 kilómetros.

Los depósitos de alta presión serían aceptables en ciertas aplicaciones de transporte, como autobuses y vehículos cuyas dimensiones permitan acomodar depósitos con suficiente capacidad de hidrógeno, pero resultarían difíciles de manejar en coches. Además, el coste actual de esos depósitos decuplica el que sería competitivo en automóviles.

Por licuefacción se puede aumentar la densidad de energía del hidrógeno almacenado; no hay opción que encierre más hidrógeno en un mismo volumen. El hidrógeno gaseoso pasa a estado líquido cuando se enfría hasta unos –253 grados Celsius, a la presión atmosférica. El hidrógeno líquido presenta una densidad de 71 gramos por litro, cerca del 30 por ciento de la densidad de energía de la gasolina. Pero los gramos de hidrógeno por litro de espacio ocupado por estos dispositivos dependen del tipo de depósito y su aislamiento.

El hidrógeno licuado presenta, sin embargo, notorios inconvenientes. En primer lugar, su bajísimo punto de ebullición requiere precauciones especiales y un equipo criogénico para manipularlo con seguridad. Además, el funcionamiento a temperaturas tan bajas exige un aislamiento de extrema calidad en los depósitos. Por último, se consume más energía en la licuefacción del gas que en su compresión hasta presiones altas. Este requisito eleva el coste del combustible y reduce el rendimiento energético global del proceso de enfriamiento criogénico.

Pese a todo, un fabricante de automoción, BMW, está llevando esta técnica a la carretera. El vehículo que presenta este año, el Hydrogen 7, incorpora un motor de combustión interna que recorre 500 kilómetros con gasolina o 200 kilómetros con hidrógeno líquido. El Hydrogen 7 se venderá en serie limitada a clientes selectos de EE.UU. y otros países donde haya estaciones para repostar hidrógeno.

Compactación química

En la búsqueda de procedimientos para elevar la densidad de energía, quizá se pueda aprovechar la química del propio hidrógeno. Cada molécula de este elemento, en sus fases de gas puro y de líquido puro, se compone de dos átomos ligados. Pero cuando los átomos de hidrógeno están químicamente unidos a otros elementos, podemos compactarlos más que en el hidrógeno líquido. Ahora se pretende encontrar materiales dotados de esa propiedad y, por tanto, idóneos para un almacenamiento compacto del combustible.

Algunos investigadores se centran en los hidruros metálicos reversibles, descubiertos casualmente en 1969 en los Laboratorios Philips de Eindhoven. Vieron allí que una aleación de cobalto y samario expuesta a hidrógeno gaseoso presurizado absorbía hidrógeno, en modo muy similar a una esponja que se empapa de agua. Al cesar la presión aplicada, reaparecía el hidrógeno absorbido en la aleación: en otras palabras, el proceso era reversible.

Se investigó con ahínco para desarrollar este descubrimiento. En EE.UU., James Reilly, del Laboratorio

MELISSA THOMAS; QUANTUM TECHNOLOGIES (*cilindro*)

Nacional de Brookhaven, y Gary Sandrock, del Centro Inco de I + D en Suffern, Nueva York, encabezaron el desarrollo de aleaciones de hidruros con propiedades de absorción de hidrógeno muy bien ajustadas. Sus primeros trabajos pusieron los fundamentos de las baterías de hidruros de metal y níquel, hoy de uso general. La densidad del hidrógeno en esas aleaciones puede ser muy alta: un 150 por ciento más que la del hidrógeno líquido, al disponerse apretados los átomos de hidrógeno entre los átomos de metal en sus retículas cristalinas.

Muchas de las propiedades de los hidruros metálicos se adaptan bien a los automóviles. Se pueden lograr densidades superiores a la del hidrógeno líquido a presiones no muy altas, del orden de 10 a 100 atmósferas. Los hidruros metálicos son, además, inherentemente estables, por lo que no necesitan energía adicional para mantener su estado, aunque sí calor para liberar el gas almacenado. Pero su talón de Aquiles se esconde en el peso, excesivo; por eso no resultan prácticos para el almacenamiento a bordo. Hasta ahora se ha conseguido que la capacidad de hidrógeno llegue al 2 por ciento del peso total del material. Esto significa que un sistema de almacenamiento de hidrógeno que ofreciera una autonomía de 500 kilómetros pesaría 450 kilogramos, sin duda demasiado para los mil y pico kilogramos de los coches actuales.

Los estudios sobre hidruros metálicos se concentran en materiales de alto contenido intrínseco de hidrógeno. Contenido que se modifica luego para satisfacer los requisitos del almacenamiento: temperaturas de funcionamiento en torno a 100 grados Celsius, presiones de 10 a 100 atmósferas y ritmo de emisión suficiente para admitir rápidas aceleraciones del vehículo. En muchos casos, los materiales que contienen hidrógeno en proporciones útiles son algo más estables de lo necesario, pues requieren temperaturas notablemente más altas para liberar el hidrógeno. El magnesio, por ejemplo, forma hidruro de magnesio con el 7,6 por ciento de su peso en hidrógeno, pero ese compuesto ha de calentarse hasta 300 grados para que libere hidrógeno. Si se desea que un sistema viable aproveche el calor desprendido por una batería de pilas de combustible (alrededor de 80 grados) para que sirva de "conmutador" que libere el hidrógeno de un hidruro metálico, la temperatura de liberación habrá de ser inferior.

Hidruros desestabilizados

John J. Vajo y Gregory L. Olson, químicos de Laboratorios HRL en Malibú, han acometido una estrategia más inteligente para superar el problema de la temperatura. Los "hidruros desestabilizados" combinan varias sustancias para alterar el camino de la reacción de tal manera que los compuestos resultantes emitan el gas a temperaturas inferiores.

Los hidruros desestabilizados forman parte de una clase de materiales que contienen hidrógeno: los hidruros complejos. Por mucho tiempo se creyó que los compuestos en cuestión no eran óptimos para repostar un vehículo, dado su carácter irreversible: una vez liberado el hidrógeno por la descomposición de las sustancias, los subproductos tendrían que ser reprocesados para devolverlos al estado hidrogenado.

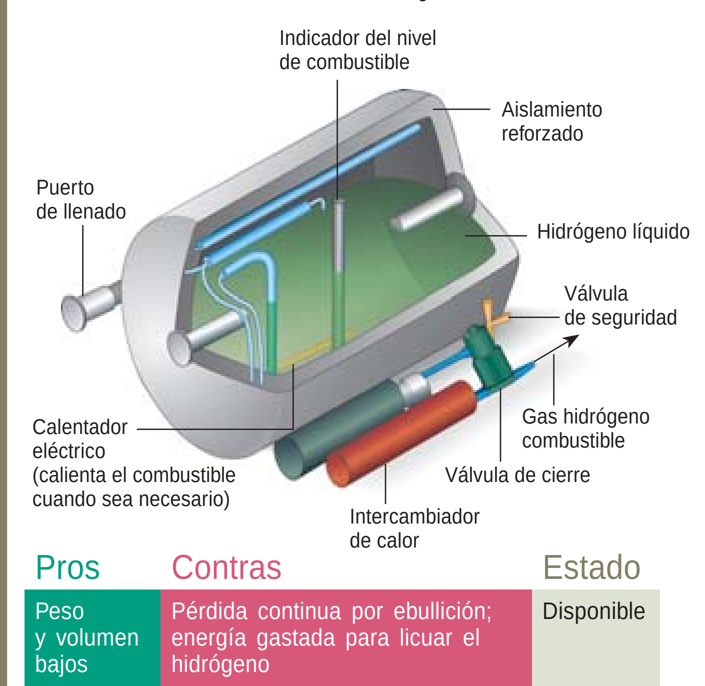
HIDROGENO LIQUIDO

Al enfriarlo hasta –253 grados Celsius, el hidrógeno se condensa y licua. Para mantener una temperatura tan baja se necesitan equipos auxiliares y de aislamiento de una magnitud considerable.

DENSIDAD DE ALMACENAMIENTO



● Hidrógeno



Pros	Contras	Estado
Peso y volumen bajos	Pérdida continua por ebullición; energía gastada para licuar el hidrógeno	Disponible

Sin embargo, Borislav Bogdanovic y Manfred Schwickardi, del Instituto Max Planck de Investigación del Carbón en Mühlheim, demostraron en 1996 que un hidruro complejo, el alanato de sodio, se volvía reversible al agregarle una pequeña dosis de titanio. El hallazgo desencadenó un torrente de actividad. El borohidruro de litio de HRL desestabilizado con hidruro de magnesio, contiene alrededor del 9 por ciento de su peso en hidrógeno de forma reversible, con una temperatura de funcionamiento de 200 grados Celsius. Tal opción supone una notable mejora, pero la temperatura de operación todavía es demasiado alta y la emisión de hidrógeno en exceso lenta para la automoción. No obstante, el trabajo ofrece buenas perspectivas.

Pese a las limitaciones de los hidruros metálicos actuales, muchos fabricantes los consideran la solución más viable, de medio a largo plazo, para presiones bajas. A este respecto, los ingenieros de Toyota y Honda están preparando una solución híbrida: un sistema que combina un hidruro de metal sólido a una presión moderada (notablemente menor que 700 atmósferas), y que podría alcanzar una autonomía superior a los 500 kilómetros. General Motors cuenta con equipos de expertos en almacenamiento, Scott Jorgensen entre ellos, que investigan en una amplia diversidad de sistemas de hidruros metálicos por todo el mundo (en Rusia, Canadá y Singapur, por

MELISSA THOMAS; LINDE (*depósito*)

HIDRUROS COMPLEJOS

La combinación química del hidrógeno con metales y otras sustancias produce hidruros metálicos (*abajo*) e hidruros complejos (*derecha*). Estas sustancias desprenden, por calentamiento, el combustible necesario

DENSIDAD DE ALMACENAMIENTO

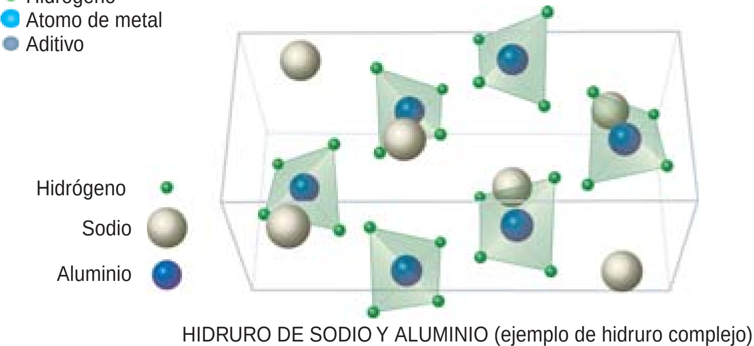


HIDRURO COMPLEJO

Hidrógeno
Atomo de metal
Aditivo

Pros	Contras	Estado
Bajo volumen; posible recarga a bordo; puede funcionar a presiones de moderadas a bajas	Elevado peso; necesidad de altas temperaturas; flujo de combustible insuficiente	En desarrollo





HIDRURO DE SODIO Y ALUMINIO (ejemplo de hidruro complejo)

ejemplo). GM colabora, además, con los Laboratorios Nacionales Sandia en un programa de cuatro años y 10 millones de dólares para producir un sistema prototipo de hidruro metálico complejo.

Portadores de hidrógeno

Otras opciones de almacenamiento podrían dar buen resultado en los automóviles, pero presentan dificultades cuando hay que reponer combustible. En general, se basan en hidruros químicos que necesitan un tratamiento industrial para reconstituir el material gastado. Un proceso que debe realizarse en el exterior. En efecto, una vez liberado el hidrógeno que se almacena a bordo del vehículo, el subproducto remanente debe retirarse en una estación de servicio para regenerarlo en una planta química.

Hace más de 20 años, se estudió en Japón el sistema decalina-naftalina. Al calentarse, la decalina ($C_{10}H_{18}$) se transforma en naftalina (compuesto de olor acre, de fórmula $C_{10}H_8$), cambiando la naturaleza de sus enlaces químicos, que liberan cinco moléculas de hidrógeno. El hidrógeno emerge en burbujas de la decalina líquida a medida que ésta se transforma en naftalina. El proceso se invierte al exponer la naftalina a gas hidrógeno a presiones moderadas: absorbe entonces hidrógeno y vuelve a ser decalina (6,2 por ciento en peso del material).

Alan Cooper y Guido Pez, de Air Products and Chemicals, en Allentown, Pennsylvania, investigan una técnica similar utilizando líquidos orgánicos (con hidrocarburos). S. Thomas Autrey y sus colaboradores, del Laboratorio Nacional del Pacífico Noroccidental, y Larry G. Sneddon, de la Universidad de Pennsylvania, están estudiando nuevos portadores líquidos, como los aminoboranos, capaces de almacenar hidrógeno en grandes cantidades y liberarlo a temperaturas moderadas.

Materiales de diseño

Todavía cabe otro enfoque del almacenamiento de hidrógeno. Se basa en materiales muy ligeros con áreas superficiales muy extensas a las que se puedan adherir (o que puedan "adsorber") las moléculas de hidrógeno. Como es de esperar, la cantidad de hidrógeno que retiene una superficie cualquiera guarda relación directa con

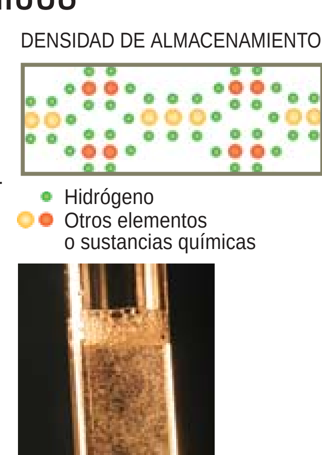
HIDRUROS QUIMICOS

Estos compuestos de hidrógeno, líquidos o sólidos, liberan combustible cuando se los calienta y expone a un catalizador (*fotografía derecha*). El flujograma muestra cómo se ha de reciclar exteriormente un hidruro químico representativo para recargarlo de hidrógeno, tras haber sido utilizado.

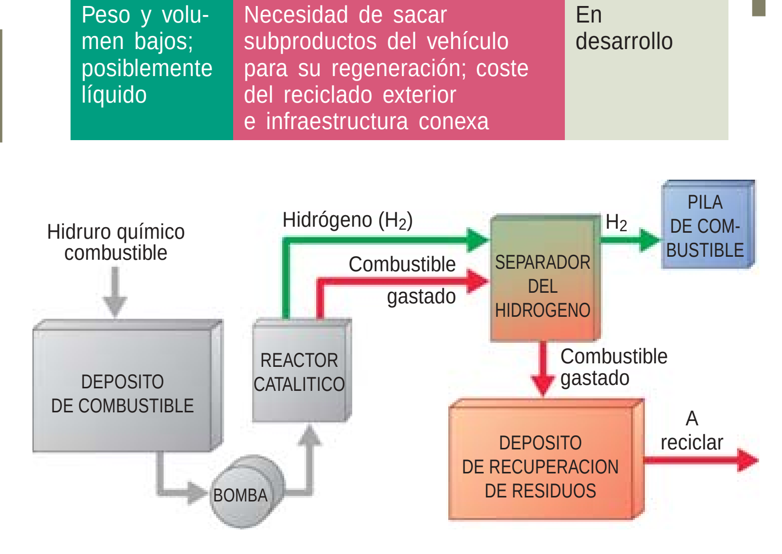
DENSIDAD DE ALMACENAMIENTO

Hidrógeno
Otros elementos o sustancias químicas

Pros	Contras	Estado
Peso y volumen bajos; posiblemente líquido	Necesidad de sacar subproductos del vehículo para su regeneración; coste del reciclado exterior e infraestructura conexa	En desarrollo



N-ETIL CARBAZOL



MELISSA THOMAS; ENERGY CONVERSION DEVICES (*investigador con hidruro*); INSTITUTO DE TECNOLOGIA ENERGETICA (*hidruro complejo*); AIR PRODUCTS AND CHEMICALS (*tubo de ensayo*)

el área expuesta. Los recientes avances en ingeniería a escala nanométrica han proporcionado multitud de nuevos materiales con una extensa exposición superficial, más de 5000 metros cuadrados por gramo de material en algunos de ellos. (Equivale a cubrir una hectárea con una sola cucharadita de polvo.) Los compuestos de carbono presentan especial interés: livianos, de coste reducido y susceptibles de formar estructuras muy diversas (nanotubos de carbono, en forma de bocina, fullerenos y aerogeles). Un material no muy caro, el carbono activado, puede almacenar hasta el 5 por ciento de su peso en hidrógeno.

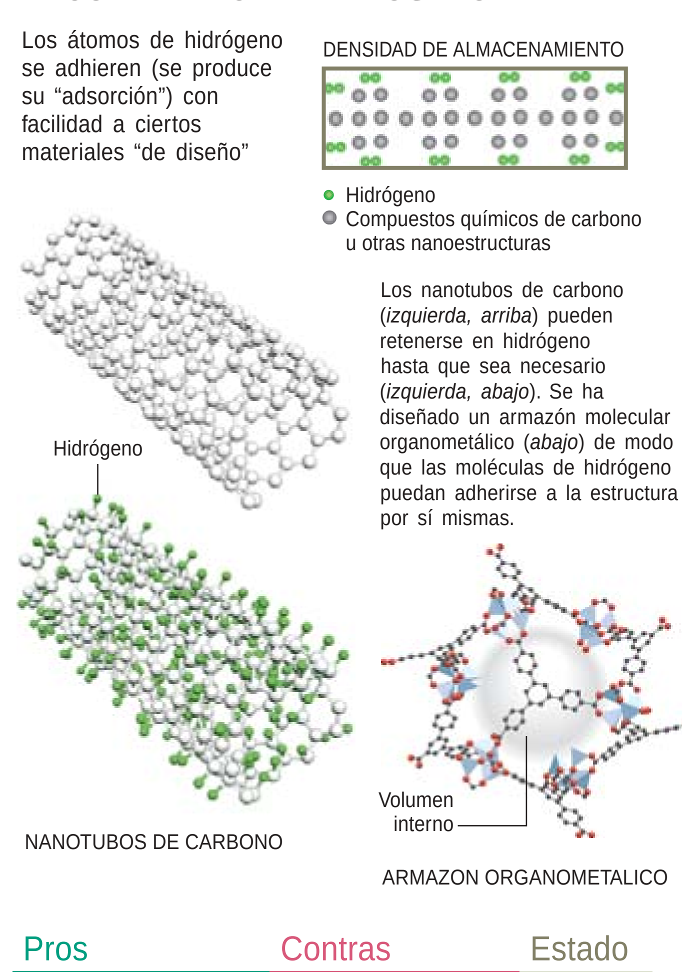
Las estructuras de carbono comparten, sin embargo, una limitación. El enlace entre las moléculas de hidrógeno y los átomos de carbono es muy débil y, por tanto, los materiales de gran área superficial deben mantenerse a la temperatura del nitrógeno líquido, –196 grados Celsius, o cerca. Al contrario que en la investigación sobre hidruros, en la que se lucha por disminuir la energía de enlace del hidrógeno, en la del carbono se ensayan maneras de aumentarla mediante la modificación de las superficies de los materiales o la adición de dopantes metálicos que alteren sus propiedades. Se utilizan modelos teóricos de las estructuras de carbono para descubrir sistemas que merezcan ulteriores estudios.

Más allá del carbono, las sustancias organometálicas ofrecen otro fascinante ejemplo de ingeniería nanométrica. Hace pocos años, Omar Yaghi, entonces profesor de química de la Universidad de Michigan en Ann Arbor y hoy en la Universidad de California en Los Angeles, inventó los armazones organometálicos (MOF, por sus siglas en inglés). Junto con sus colaboradores, demostró que esta nueva clase de materiales cristalinos de alta porosidad podrían obtenerse por la unión de compuestos inorgánicos con "riostras" orgánicas. De ahí resultan MOF sintéticos con estructuras de elegante aspecto y características físicas susceptibles de que se las controle para satisfacer diversas funciones. Estas estructuras heterogéneas pueden exhibir grandes áreas superficiales (hasta de 5500 metros cuadrados por gramo); además, es posible ajustar puntos químicos en ellas para que el enlace con el hidrógeno sea óptimo. Hasta la fecha, se han probado MOF que alcanzan capacidades del 7 por ciento de su peso en hidrógeno a –196 grados Celsius. Prosiguen los trabajos para mejorar estos valores.

Aunque sea alentador el progreso actual en el almacenamiento de hidrógeno, encontrar el "punto justo" puede llevar más tiempo y exigir persistentes esfuerzos en investigación y desarrollo. Desde que a finales del siglo XVIII Jacques Charles surcara los cielos gracias al hidrógeno encerrado en una envoltura práctica y ligera, se mantiene la ilusión —y también la dificultad— de utilizar el hidrógeno para el transporte. Cuando se encuentre un recipiente tan idóneo para almacenar hidrógeno en automóviles, en las próximas décadas del siglo XXI se podrá viajar por todo el mundo sin ensuciar el cielo que nos cubre.

ADSORBENTES DE HIDROGENO

Los átomos de hidrógeno se adhieren (se produce su "adsorción") con facilidad a ciertos materiales "de diseño"



Los nanotubos de carbono (*izquierda, arriba*) pueden retenerse en hidrógeno hasta que sea necesario (*izquierda, abajo*). Se ha diseñado un armazón molecular organometálico (*abajo*) de modo que las moléculas de hidrógeno puedan adherirse a la estructura por sí mismas.

Pros	Contras	Estado
Peso bajo; reversible a bordo; posible funcionamiento a temperatura ambiente	Alto volumen; posible necesidad de bajas temperaturas para el funcionamiento	Fase inicial de I+D

Los autores

Sunita Satyapal, John Petrovic y **George Thomas** trabajan en el programa de investigación aplicada y desarrollo de las técnicas de almacenamiento de hidrógeno del Departamento de Energía de EE.UU. (DOE). Satyapal dirige el equipo de almacenamiento del hidrógeno en el DOE. Petrovic, que trabajó en el Laboratorio Nacional de Los Alamos, es consultor del DOE y miembro de la Sociedad Norteamericana de Cerámica y la Sociedad Norteamericana de Materiales Internacionales. Thomas, actualmente consultor del DOE, lleva más de 30 años estudiando los efectos del hidrógeno en los metales en los Laboratorios Nacionales Sandia. Los autores declaran que sus opiniones no reflejan las del DOE.

Bibliografía complementaria

THE HYDROGEN ECONOMY: OPPORTUNITIES, COSTS, BARRIERS, AND R&D NEEDS. National Research Council and National Academy of Engineering. National Academies Press, 2004. Disponible en www.nap.edu/catalog.php?record_id=10922

HYDROGEN PROGRAM: 2006 ANNUAL MERIT REVIEW PROCEEDINGS. U.S. Department of Energy. Disponible en www.hydrogen.energy.gov/annual_review06_proceedings.html

UNITED STATES COUNCIL FOR AUTOMOTIVE RESEARCH: www.uscar.org

International Energy Agency's Hydrogen Implementing Agreement: www.ieahia.org

INTERNATIONAL PARTNERSHIP FOR THE HYDROGEN ECONOMY: www.iphe.net

MELISSA THOMAS; ANTON NIKITIN *Laboratorio de radiación del sincrotrón de Stanford (nanotubos)*; OMAR M. YAGHI U.C.L.A. (*armazón organometálico*)

TALLER Y LABORATORIO

Marc Boada

Péndulo caótico

Muchas fueron las novedades introducidas en la física del siglo XX. Entre las más divulgadas destaca la teoría del caos. Algunas expresiones han calado en el léxico común; verbigracia, el "efecto mariposa", que acuñó E. N. Lorenz en 1963. Ya no hace falta ser una experto para comprender, de forma intuitiva, que ligeras perturbaciones iniciales en un sistema pueden verse amplificadas hasta tornar a éste en impredecible.

Al experimentador suele molestarle la aparición de fenómenos no deterministas. Por ello, cuando en un dispositivo las respuestas obtenidas son aleatorias y no extrapolables a partir de las condiciones iniciales, lo mejor es volver a empezar: nuevo diseño experimental y nuevo montaje.

En ocasiones, empero, es el propio resultado no predictible el que estimula al investigador. Constituyen buena prueba de ello los artefactos mecánicos que evolucionan en el tiempo sin que acertemos a anticipar cuál será el movimiento siguiente. El reto consiste en crear un sistema muy simple que, abandonado a su propio funcionamiento, termine por resultar impredictible. La construcción de péndulos abre un vasto campo de actividad que nos permite disfrutar de las sutilidades del caos determinista.

Un péndulo consiste en una masa densa y pesada que oscila suspendida por un hilo o una varilla. Construido así, la predictibilidad es total: efectúa un movimiento armónico simple, cuyo período depende de la longitud del péndulo y de la intensidad del campo gravitatorio en el que se halla sumido. Esa regularidad pendular se ha utilizado para gobernar con excelentes resultados el movimiento de relojes. Sin embargo, se trata de una regularidad más aparente que real, puesto que el período del péndulo depende también de la amplitud de la oscilación [*véase* "Péndulo gravimétrico", INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 2005].

Aprovechando la propiedad anterior, podemos construir sistemas compuestos por dos o más péndulos acoplados mediante hilos o muelles. Si la amplitud de la oscilación adquiere cierto valor, la evolución del conjunto escapará a la predicción de la posición relativa de las masas en un instante concreto. Otra opción de interés consiste en utilizar un péndulo amortiguado por una pequeña masa opuesta a la principal; pensemos en una varilla con dos pesos y un eje de oscilación entre éstos. Se crea un sistema pendular más lento con un período de oscilación mayor y un movimiento más elegante. En ese caso, sin embargo, nos alejamos notablemente del péndulo matemático.

El análisis del sistema debe contemplar el momento de inercia de las masas en movimiento. El cálculo del período entraña aquí mayor complejidad. Utilizaremos la ecuación del movimiento para un péndulo físico: $\ddot{\theta} = -mgb/I\ (\mathrm{sen}\ \theta)$, donde θ representa el ángulo respecto a la vertical, m la masa, g la aceleración de la gravedad, b la distancia del centro de giro al centro de gravedad e I el momento de inercia del sólido alrededor del eje de giro. Empezarán a ser perceptibles los efectos de la fricción en el punto de oscilación y otras perturbaciones.

Podemos también acoplar péndulos amortiguados. Mediante el ajuste de la posición de las masas y el valor de éstas, la ergodicidad —como diría un estadístico—, o la aleatoriedad, está garantizada.

Otra disposición interesante pasa por dar una máxima libertad de movimiento a uno de los péndulos. Viene en nuestra ayuda un elemento con numerosas aplicaciones: la unión o junta cardan. Se utilizaba ya en la antigua China; en Europa la dio a conocer Girolamo Cardano (1501-1576). Consta de un arreglo de dos ejes perpendiculares y anillas u horquillas, capaz de tomar todas las orientaciones en el espacio. En nuestro caso, añadiremos otro eje, el de la oscilación del péndulo. De esa forma, el péndulo, suspendido en su centro, podrá apuntar en cualquier dirección y, además, oscilar con total libertad.

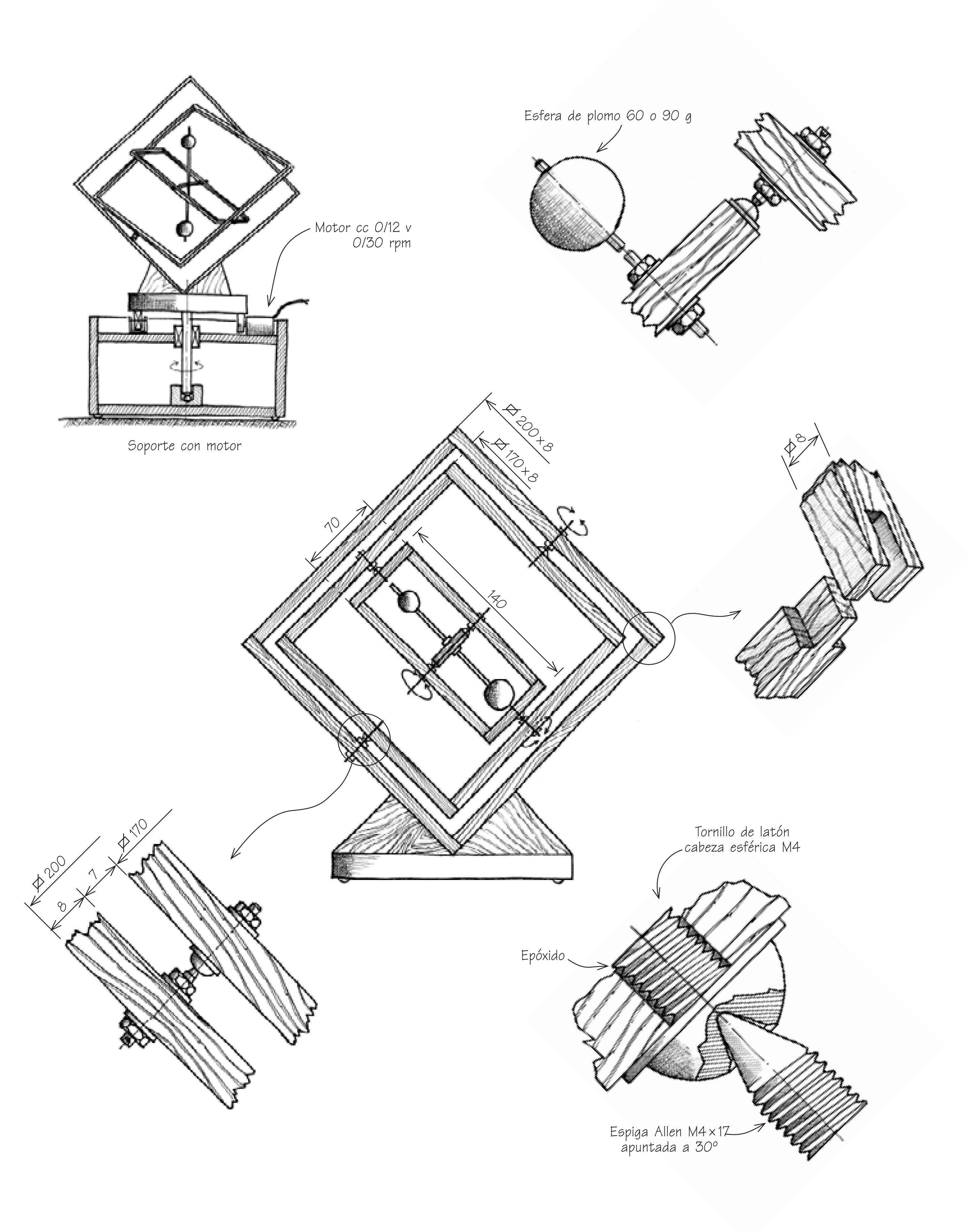
Para su construcción tendremos presente que el peso de las anillas sea despreciable respecto del péndulo situado en su interior. Por ello, se aconseja el uso de materiales de baja densidad o la reducción máxima de las secciones. En general, resulta indiferente utilizar las anillas circulares o poligonales; optaremos por uno u otro diseño en función de nuestra destreza técnica. Describiremos aquí la opción cuadrada, de mayor sencillez. Para su materialización, nos proveeremos en un comercio de modelismo de finos listones de madera dura (haya, por ejemplo), que cortaremos y mecanizaremos con precisión.

Antes de encolar bien los listones, practicaremos los taladros donde situaremos luego ejes y cojinetes de giro. La solución que proponemos produce una ligera fricción. Sin embargo, puede mejorarse mediante la combinación ingeniosa de toda la gama de accesorios del aeromodelismo; se consigue así el ajuste preciso de todos los puntos de giro.

Para la masa pendular emplearemos una varilla roscada; fijaremos en ella los pesos de plomo esféricos que se utilizan en la pesca deportiva. En mi dispositivo, los pesos respectivos son de 90 y 60 gramos, aunque estos valores pueden aumentarse si ello se acompaña de una mayor rigidez estructural.

Realizadas esas manipulaciones montaremos el conjunto, que deberá estar bien lubricado y exento de huelgos en sus puntos de giro.

Antes de fijarlo en el soporte a 45º, realizaremos algunas pruebas. Tomemos el artefacto y coloquémoslo


Esfera de plomo 60 o 90 g
Motor cc 0/12 v
0/30 rpm
Soporte con motor
Ø 200×8
Ø 170×8
70
140
Ø 8
Ø 200
Ø 170
8
7
Tornillo de latón
cabeza esférica M4
Epóxido
Espiga Allen M4×17
apuntada a 30º





vertical, reposando sobre un lateral. Impulsemos el péndulo. Comprobaremos que éste oscila como cualquier otro. Impulsemos ahora la anilla móvil exterior; si la construcción es correcta, girará quedando el péndulo casi inmóvil. Probemos ahora con la anilla exterior en posición horizontal; repitamos las pruebas anteriores. Tampoco observamos caos.

En cambio, una vez montado a 45º, el comportamiento cambia de una forma radical. Si aportamos energía al sistema por la vía de impulsar cualquier anilla, comprobaremos que las esferas de plomo pasan por diversas posiciones en el espacio. ¿Por qué? Con la colaboración de Miquel Noguera, de la Universidad Politécnica de Cataluña, hemos analizado el sistema. Su extraño comportamiento responde a un fenómeno de indecibilidad. Expliquémonos.

Cuando el péndulo se mueve, intenta trazar una órbita que mantenga estable su momento angular. Gracias a la redundancia del mecanismo (recordemos que a los dos ejes de la suspensión cardan se suma el de oscilación), el péndulo puede seguir órbitas distintas, ya que le es posible girar sobre más de un eje. Por tanto, en según

Caos o no caos

Entenderemos por caótico aquel sistema dotado de soluciones que en su inicio pueden estar infinitamente próximas, pero al cabo de poco tiempo dan comportamientos muy dispares. Ello imposibilita realizar predicciones a largo plazo; además, dada una configuración del sistema, no hay forma de saber cómo se ha llegado hasta ella.

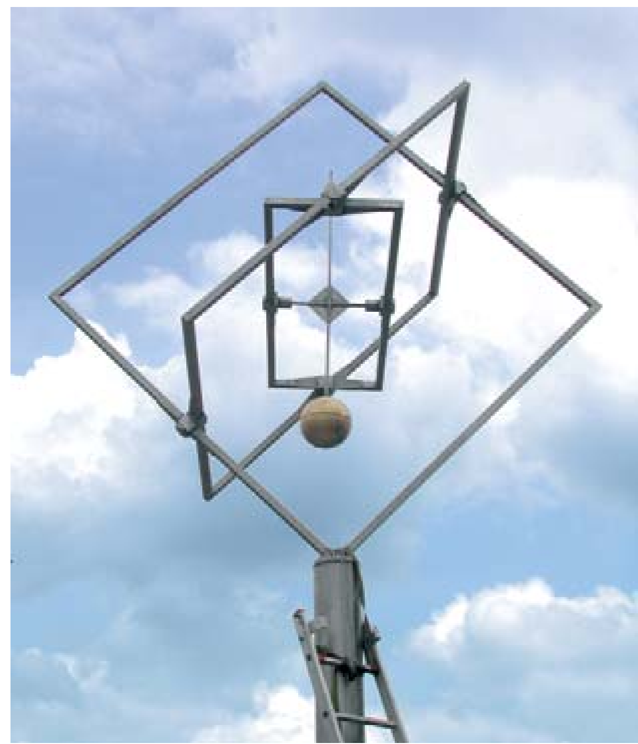
Se distingue ese tipo de comportamiento por la diversidad de soluciones que ofrece. En algunos casos, podemos incluso asegurar que existen las condiciones iniciales para cualquier comportamiento que seamos capaces de imaginar.

Podemos abordar el estudio de un sistema caótico desde una doble óptica. La primera consiste en encontrar un modelo matemático potente que describa el sistema: en nuestro caso, las ecuaciones del péndulo construido. Luego, mediante un análisis cualitativo, se demuestra la existencia de elementos generadores de caos determinista: por ejemplo, atractores extraños u órbitas homoclínicas. Los resultados de las ecuaciones de Edward Lorenz (publicados en 1963) sobre un sencillo modelo de evolución de un fluido constituyen un claro exponente de ese tipo de enfoque.

La segunda aproximación consiste en tomar medidas, en lo posible precisas, del movimiento del sistema a lo largo del tiempo. En nuestro caso podrían realizarse fotografías bajo una luz estroboscópica de alta frecuencia y medir luego la evolución de alguno de los ángulos del péndulo. A continuación, se calculan ciertos parámetros que caracterizan la existencia de caos en una serie temporal: por ejemplo, los exponentes de Lyapunov o la entropía.

Para ello pueden utilizarse los programas TISEAN (http://www.mpipks-dresden.mpg.de/~tisean/). Esa es la técnica que se utiliza para la detección de caos en cardiogramas o encefalogramas.







Péndulo caótico de 2 metros, instalado en el Jardín de las Percepciones del Parque de Vallparadís, Tarrasa.

qué posiciones el péndulo “escoge”, animado por sutiles perturbaciones, uno u otro eje de giro.

Según la teoría del caos determinista, una de las causas de la diversidad de comportamientos de un sistema dinámico viene expresada por la existencia de atractores extraños. Los atractores son formas geométricas que caracterizan el comportamiento a largo plazo en el espacio de configuraciones. A grandes rasgos, un atractor es a lo que tiende, o a lo que es atraído, el comportamiento de un sistema (se empiece donde se quiera, el sistema se dirige hacia esa región). El tipo más simple de atractor es un punto fijo. Es el que opera en un péndulo simple con rozamiento: el péndulo llega siempre a la misma posición de reposo, independientemente del modo en que empezó a oscilar. Se trata de un atractor predecible, pues su comportamiento puede pronosticarse con exactitud.

Los atractores caóticos, o extraños, en cambio, corresponden a movimientos impredecibles; adquieren una forma geométrica más compleja. Observado a gran escala, un atractor caótico constituye una superficie que se pliega sobre sí misma. El carácter extraño de su estructura matemática —que guarda cierta semejanza con la de un fractal— produce el efecto caótico mencionado. Es decir, a pesar de que dos soluciones tengan un inicio muy próximo, al ser atraídas por un atractor caótico caen rápidamente en zonas distintas, dando comportamientos dispares. (El lector que desee ahondar en este tema puede empezar con el conocido atractor de Lorenz.)

Mediante el ensayo de modelos de tamaño distinto, el experimentador descubre que un incremento del tamaño produce un movimiento más suave y, lógicamente, de mayor duración. Ello es debido a que la fricción y el peso de las anillas no crecen tan rápido como el período del péndulo y su inercia. Nos hallamos ante un típico fenómeno no escalar, de interés para la construcción de péndulos, que nos obliga a descartar tamaños por debajo del decímetro y optar por tamaños mayores.

En ese sentido, el modelo propuesto puede ampliarse sin demasiadas modificaciones hasta 500 milímetros o más, correspondiendo esta cifra al tamaño del conjunto, es decir, a la medida máxima de la anilla exterior. Pero a partir de ciertas dimensiones, deberán reconsiderarse los ejes de giro mediante la incorporación de rodamientos de bolas; también la estructura de las anillas, que deberá ser más sólida. Al alcanzar dimensiones métricas, el período del péndulo llega a varios segundos; el fenómeno adquiere una gran espectacularidad.

Mediante una construcción atenta, la fricción puede reducirse a valores mínimos; el par necesario para vencer la resistencia de los ejes será inferior a 1 N/m.

Para motorizar el movimiento del péndulo, basta colocar éste sobre una base rotatoria que incorpore un motor de velocidad regulable (por ejemplo, de 0 a 30 revoluciones por minuto) y de doble sentido de giro. Por ejemplo, un pequeño motor a pilas con reductor. El accionamiento debe ser intermitente; la maniobra irá a cargo de un temporizador cíclico, es decir, uno en que podamos programar un tiempo de funcionamiento y uno de parada, o, mejor aún, fases de giro en sentido horario y antihorario con paradas intermedias.

Las velocidades y frecuencias de accionamiento deberán sincronizarse con el período fundamental del péndulo, que se ajustará mediante el desplazamiento de las masas de plomo. Cuanto mayor sea éste, menores serán la velocidad y la cadencia.

Juan M.R. Parrondo

Pensamiento formal y pensamiento concreto

Observen la figura 1. En ella hay cuatro cartas. Cada una de ellas tiene en uno de sus lados una letra y en el reverso un número. Como ven, algunas presentan visible el número y otras la letra. Fíjense en la afirmación del recuadro que hay encima de las cartas: *Detrás de toda letra D está el número 3*. ¿Qué cartas tienen que voltear para comprobar que la afirmación es cierta? Una pista: la afirmación dice sólo que demuestren que detrás de una D hay un 3, pero no dice nada acerca del reverso de un 3. ¿Han resuelto ya el problema? Anoten la solución en un papel y pasemos a la siguiente prueba.

DETRAS DE TODA D HAY UN 3



1. ¿Qué cartas hay que levantar para comprobar la afirmación del cuadro superior?

Observen ahora la figura 2. Cuatro personas están en un bar consumiendo alguna bebida. En la figura se indica de cada una de ellas o bien la edad o bien lo que están bebiendo. Usted tiene que comprobar que *todo el que bebe alcohol es mayor de 18 años*. ¿A quién tiene que preguntar la edad o lo que bebe para comprobar dicha afirmación?

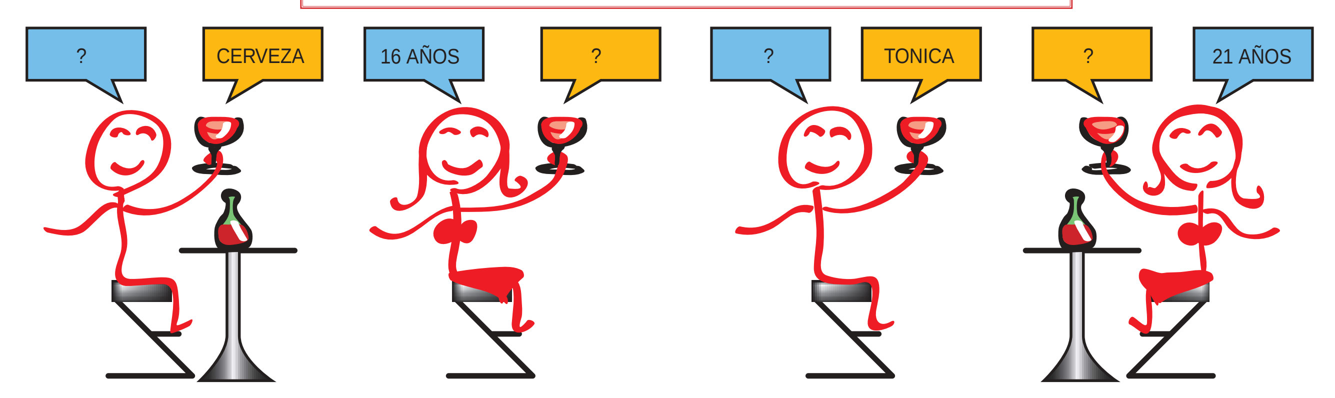
Supongo que este último "problema" les habrá resultado bastante trivial. La mayoría de la gente lo resuelve de forma casi inmediata: hay que preguntar la edad al individuo que bebe cerveza y la bebida que está consumiendo la chica de 16 años.

Sin embargo, en el problema de la figura 1 la mayoría de la gente se equivoca. Para confirmar la frase recuadrada hay que voltear la carta que tiene una D y comprobar que en efecto hay un 3 en su reverso, pero también la que tiene un 1, para comprobar que *no hay* una D en su reverso, puesto que en ese caso tendríamos una carta con el par D-1 y la afirmación recuadrada sería falsa. Si usted ha fallado en el problema de la figura 1, no se preocupe: sólo alrededor de un 10 % de la población encuentra la respuesta correcta y este porcentaje ni siquiera superó el 50 % cuando se realizó la prueba a profesores universitarios de matemáticas.

Lo curioso de este par de problemas es que formalmente son idénticos. En ambos se pide comprobar que cierta propiedad P (tener una D en una de sus caras en el primer caso, beber alcohol en el segundo) implica o está siempre acompañada de cierta propiedad Q (tener un 3 en una de las caras en el primer caso, ser mayor de 18 años en el segundo). En ambos se muestran cuatro casos: uno que verifica P, otro que no verifica Q, un tercero que no verifica P y un cuarto que verifica Q, tal y como se ve en la figura 3. El lector puede comprobar que incluso el orden en que están dispuestas las cartas de la figura 1 y los individuos de la figura 2 es *formalmente* el mismo que el de la figura 3.

De este pequeño experimento, diseñado por el psicólogo Peter C. Wason en 1968, se deduce que los seres humanos no pensamos formalmente, es decir, basándonos sólo en relaciones lógicas, sino que lo hacemos en función del *significado* de las afirmaciones que tenemos que demostrar o comprobar. Nuestro modo de pensar es semántico y no puramente lógico. A muchos puede parecerles esta afirmación evidente y un tanto trivial. Sin embargo, los que nos dedicamos a la matemática o a la enseñanza de la matemática tendemos a olvidarnos de ello. Son mayoría los matemáticos que piensan que la lógica formal es el esqueleto del pensamiento, sobre el que luego se añaden significados. Con esta concepción, muchos profesores de matemáticas nos desesperamos porque nuestros alumnos no son capaces de extrapolar un argumento de una situación a otra. Deberíamos recordar que el pensamiento formal es una *construcción* bastante elaborada y basada en el pensamiento referido a situaciones concretas, y que habría que partir de este último para llegar al primero. Creo que gran parte del fracaso escolar en matemáticas se debe a que los "espíritus geómetras", como decía Pascal, no somos conscientes de la artificialidad del pensamiento formal, que está basado en "principios [que] son palpables pero se apartan del uso común, de modo que nos cuesta volver la cabeza hacia ese lado, por falta de hábito".

El test de Wason es una herramienta excelente para investigar cómo razonamos. Los resultados del test ponen de manifiesto que utilizamos dos sistemas de razonamiento: uno inmediato, inconsciente e intuitivo, que en algunos artículos se denomina *sistema 1*, y otro formal



2. ¿A quién hay que preguntar la edad o lo que está bebiendo para comprobar la afirmación del cuadro superior?

y consciente, el *sistema 2*. Cuando nos presentan el test, el sistema 1 elige las cartas que aparecen en la afirmación que tenemos que comprobar, es decir, la carta con la D y la carta con el 3. Es lo que los psicólogos llaman "*matching bias*", que podríamos traducir como sesgo por afinidad. Después entra en juego el sistema 2, que corrige esta primera conclusión del sistema 1. En esta etapa, mucha gente se da cuenta de que no es necesario voltear la carta con el 3, puesto que sólo se nos pide comprobar que toda carta con una D tiene un 3 en su reverso, pero nada se informa de las cartas con un 3. En este análisis, sin embargo, la carta con el 1 pasa inadvertida para la mayoría de la gente (es lo que me pasó a mí cuando realicé el test). Como prueba de estos mecanismos, se ha realizado el test registrando el movimiento de los ojos de los participantes y se ha comprobado que éstos pasan la mayor parte del tiempo analizando las cartas D y 3.

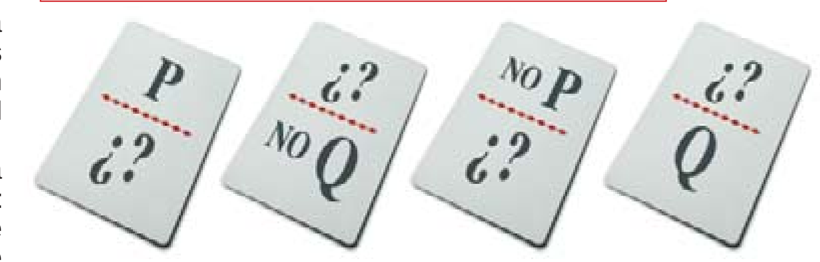
Otra forma, más interesante y más extendida, de experimentar con el test de Wason es dotar de significado a las propiedades P y Q de la figura 3, tal y como hemos hecho con el ejemplo del bar de la figura 2. Existen numerosas variantes de este tipo clasificadas según el significado de P y Q.

El grupo de John Tooby, de la Universidad de California en Santa Bárbara, distingue tres situaciones diferentes: reglas descriptivas, reglas de contrato social y reglas de precaución. En la primera, P y Q son propiedades que sólo describen algún objeto o situación. El test original con las cartas es un ejemplo de este tipo de regla. Pero también los hay que utilizan propiedades del mundo real: comprueben la afirmación "siempre que se poda el jazmín a finales del invierno, florece en primavera", en los cuatro casos siguientes: 1) un jazmín que se ha podado, 2) otro que no ha florecido, 3) uno que no se ha podado y 4) otro que ha florecido. La respuesta correcta es: preguntar si 1) ha florecido y preguntar si 2) ha sido podado. ¿Encontraría el lector la respuesta correcta o pasarían inadvertidos los jazmines no florecidos?

El segundo tipo de situación es el contrato social, donde P consiste en algún tipo de beneficio y Q en alguna obligación. Por ejemplo, P puede ser "tomar prestado un coche" y Q "llenar el depósito de gasolina". En la tercera regla, peligro/precaución, P es la exposición a un peligro, como "trabajar con muestras contaminadas", y Q una medida de seguridad, como "utilizar guantes". Nuestro ejemplo del bar pertenecería a esta regla de precaución (aunque tiene también algo de contrato social). Tooby y sus colaboradores han llegado a la conclusión, mediante multitud de experimentos, de que sólo entre un 20 % y un 30 % de la gente encuentra la solución correcta en las reglas descriptivas, mientras que el porcentaje sube al 70 % o el 80 % en las reglas de contrato social y las de precaución. De ello deducen que los seres humanos poseemos mecanismos de razonamiento intuitivo e inconsciente, adaptados a este tipo de situaciones y que se han desarrollado a lo largo de la evolución biológica porque eran especialmente útiles para la supervivencia de la especie.

Pero estas conclusiones se hallan sujetas a debate. Una explicación alternativa a los resultados del test de Wason es la *teoría de la relevancia cognitiva*, que afirma que nuestro sistema de razonamiento inconsciente otorga un peso a las distintas realizaciones del test de acuerdo con su relevancia cognitiva, es decir, con la capacidad de cada realización de cambiar nuestro conocimiento acerca del mundo. Este sistema de razonamiento es más general que la propuesta de Tooby, en la que se supone la existencia de sistemas de razonamiento específicos para cierto tipo de situaciones, como la regla de contrato social y la de peligro/precaución.

En cualquier caso, creo que la lección más importante que proporciona el test de Wason, especialmente para quienes enseñamos matemáticas, es que hay que tener cuidado cuando tratamos de desarrollar en nuestros alumnos el razonamiento formal. Por un lado, nos recuerda que el razonamiento formal es una elaboración artificial a la que no se tiene por qué acceder de un modo "natural". Por otro, el test nos puede ayudar a encontrar ejemplos eficaces para enseñar ciertas reglas lógicas.



3. ¿Qué información es necesaria para comprobar la afirmación del cuadro superior?

Mark Fischetti

CONTROL ELECTRONICO DE ESTABILIDAD

Conducir sin sobresaltos

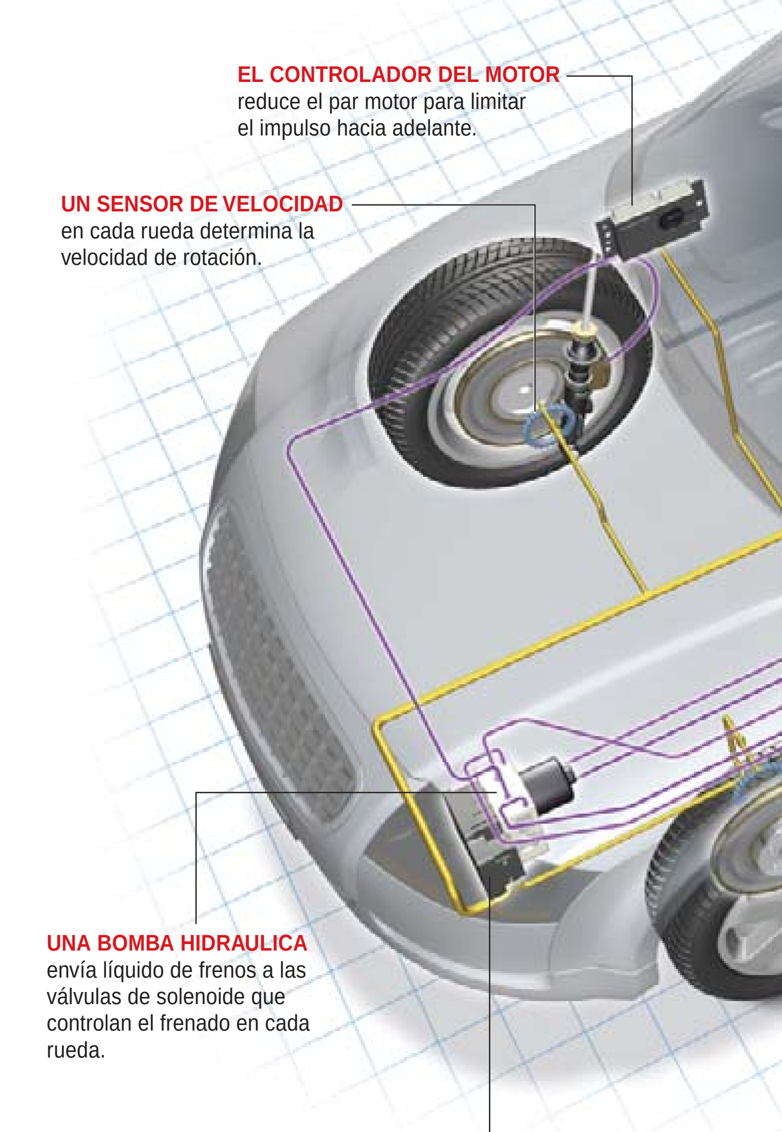
La industria automovilística ofrece ya el control electrónico de estabilidad (ESC, de "Electronic Stability Control") en los turismos. Esa técnica evita que los coches patinen, se salgan de la carretera o vuelquen. Culmina una evolución que tuvo su origen en los frenos antibloqueo.

Si un conductor acciona demasiado fuerte el pedal del freno, las válvulas hidráulicas reducen la presión de frenado en una rueda para que ésta no se trabe. Cuando ese mecanismo se generalizó en los noventa, los fabricantes añadieron las válvulas de control de tracción, que permiten que una rueda motriz que esté pivotando se adhiera a la calzada.

Para controlar la estabilidad, los ingenieros ampliaron el sistema hidráulico para que aplicara presión a cualquier rueda, aun cuando el conductor no estuviera frenando. Cuando los sensores indican que el vehículo no vira, sino que patina hacia delante, o vira en demasía, los actuadores frenan momentáneamente determinadas ruedas para corregir la trayectoria. En la opinión de Scott Dahl, de la empresa Robert Bosch, el paso al control electrónico de la estabilidad constituyó un progreso épico. Para ello se añadieron sensores que determinan lo que el conductor trata de hacer y lo comparan con lo que el coche está haciendo en realidad. Asimismo, se solicita al ordenador de control del motor que reduzca el par motor para rebajar el impulso descontrolado.

Los sistemas recientes van más lejos. Philip Headley, de Continental Automotive Systems, explica que el control electrónico de estabilidad conduce con los frenos; las nuevas versiones utilizan también el mecanismo del volante. Los actuadores instalados en la columna de dirección mueven las ruedas (el volante en sí no se mueve). Y aunque todos los sistemas rebajan la posibilidad de vuelco mediante la minimización del deslizamiento lateral, si un coche empieza a despegar, los modelos de última generación aplican patrones de frenado para devolver las ruedas que se elevan al contacto con la calzada.

En EE.UU., la Administración Nacional para la Seguridad del Tráfico en las Autopistas estima que el control de estabilidad incrementa en unos 111 dólares el precio de un coche. Declara que se trata de una técnica que habría de salvar hasta unas 10.300 vidas al año, de instalarse en todos los vehículos de pasajeros; ocuparía la segunda posición, después de los cinturones de seguridad y antes de los airbags.



1. LOS SENSORES DEL CONTROL ELECTRONICO DE ESTABILIDAD (ESC) comparan la dirección que el conductor trata de comunicar al vehículo con la que éste lleva en realidad; los actuadores controlan los frenos y el motor para contrarrestar la tendencia a entrar en una trayectoria errática.

SAMUEL VELASCO; FUENTES: CONTINENTAL AUTOMOTIVE SYSTEMS; ROBERT BOSCH

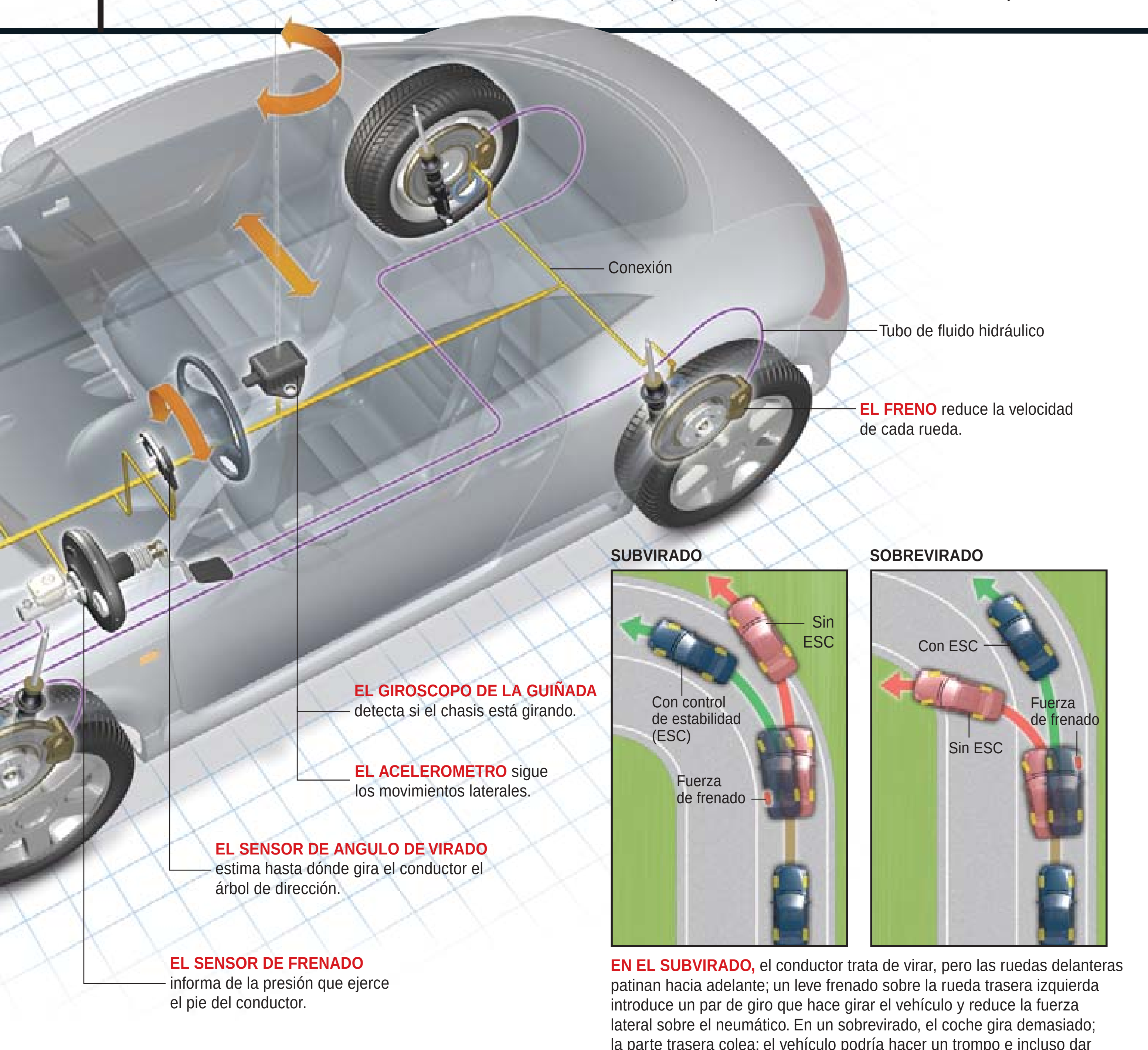
¿SABIA USTED QUE...?

➤ **INHABILITADOR**: La mayoría de los fabricantes dejan al conductor la opción de desconectar temporalmente el control electrónico de estabilidad para hacer girar las ruedas; ello permite escapar de un ventisquero o hacer trompos en un estacionamiento.

➤ **DIFERENCIA EN TRACCION TOTAL**: La propulsión en las cuatro ruedas opera mediante la traba de los puentes delantero y trasero, lo que imposibilita frenar sólo una rueda. Un ordenador de control de estabilidad debe dar instrucciones al diferencial que une ambos puentes para que se desbloquee antes de que se inicie el frenado correctivo; algunos sistemas se desconectan en los vehículos de tracción total.

➤ **CONTROL DE DENOMINACION**: Buscando la novedad, los fabricantes de automóviles etiquetan sus sistemas electrónicos de estabilidad con toda una variedad de nombres comerciales. Entre ellos: Dynamic Stability Control (BMW), StabiliTrak (General Motors) e Interactive Vehicle Dynamics (Ford).

➤ **LO QUE VIENE DESPUES**: Dado que los sistemas de estabilidad pueden frenar cada rueda, se están empleando en los sistemas de previsión precoz de colisión, que incorporan algunos coches. El vehículo emite un haz de radar para determinar si el conductor se está acercando demasiado al coche que le precede, en cuyo caso aplica los frenos. En el futuro, el control de la conducción podría incorporar sistemas de mantenimiento del carril, que impedirían a los conductores salirse del suyo.



EN EL SUBVIRADO, el conductor trata de virar, pero las ruedas delanteras patinan hacia adelante; un leve frenado sobre la rueda trasera izquierda introduce un par de giro que hace girar el vehículo y reduce la fuerza lateral sobre el neumático. En un sobrevirado, el coche gira demasiado; la parte trasera colea; el vehículo podría hacer un trompo e incluso dar una vuelta de campana. Un leve frenado sobre la rueda delantera derecha introduce un eje de giro y reduce la fuerza lateral.

LIBROS

Desarrollo

Patrones comunes

COMING TO LIFE. HOW GENES DRIVE DEVELOPMENT, por Christiane Nüsslein-Volhard. Yale University Press; New Haven-Londres, 2006.

ROBUSTNESS AND EVOLVABILITY IN LIVING SYSTEMS, por Andreas Wagner. Princeton University Press; Princeton, 2005.

ENDLESS FORMS MOST BEAUTIFUL: THE NEW SCIENCE OF EVO DEVO AND THE MAKING OF ANIMAL KINGDOM, por Sean B. Carroll. Norton; Nueva York, 2005.

GENES IN DEVELOPMENT. RE-READING THE MOLECULAR PARADIGM. Edición preparada por Eva M. Neumann-Held y Christoph Rehmann-Sutter. Duke University Press; Durham, 2006.

EVOLUTION IN FOUR DIMENSIONS. GENETIC, EPIGENETIC, BEHAVIORAL, AND SYMBOLIC VARIATION IN THE HISTORY OF LIFE, por Eva Jablonska y Marion J. Lamb. A Bradford Book. The MIT Press; Cambridge, Massachusetts, 2005.

Propiedad distintiva del ser vivo es su capacidad de reproducción. Los individuos de hoy portan la plantilla de las generaciones subsiguientes. Un guión escrito en ADN, encerrado en la célula. Porque son las células y no los genes quienes constituyen las unidades elementales de la vida. Los genes aportan a la célula un repertorio de instrucciones para crecer, dividirse, diferenciarse y, llegado el momento, construir un nuevo organismo. Amén de genes, las células alojan las enzimas necesarias para la multiplicación. Con el avance de la ciencia podemos aislar genes y observarlos en pleno ejercicio.

No fue un camino fácil llegar hasta ahí. La zoología del siglo XIX dio un primer impulso al ir más allá del descubrimiento, descripción y clasificación de nuevas especies. Comenzó a ocuparse del desarrollo. Las estaciones marinas de Nápoles y de Woods Hole crearon los nuevos métodos, el utillaje y la base teórica del desarrollo embrionario, en particular, de especímenes translúcidos. Los animales ovíparos —erizos de mar, ranas, peces y gusanos— constituían modelos excelentes para el estudio de las primeras fases de la formación del animal.

Thomas Hunt Morgan colocó otro foco de atención en *Drosophila melanogaster*, que habría de convertirse en modelo ideal para la investigación genética y epigenética. Presenta un exoesqueleto recubierto de pelos y cerdas. Posee ojos rojos, cuerpo pardo, antenas y alas. Con tiempo de generación muy breve, una pareja puede producir numerosa descendencia. Tiene cuatro cromosomas. La larva de la mosca es un organismo segmentado, que se desarrolla en el interior del huevo. La larva crece y muda su cutícula dos veces antes de convertirse en pupa. Luego, la mosca madura, o imago, emerge de la pupa a los 12 días de desarrollo.

A la mosca de la fruta ha consagrado decenios de investigación Christiane Nüsslein-Volhard, quien nos ofrece en *Coming to Life: How Genes Drive Development*, un magnífico prontuario de genética y biología del desarrollo. Se suma con autoridad a los óptimos tratados *Developmental Biology*, de S. F. Gilbert, y *Principles of Development*, de L. Wolpert *et alii*. Por su parte, *Endless Forms Most Beautiful: The New Science of Evo Devo and the Making of Animal Kingdom*, de Sean Carroll, combina biología del desarrollo con evolución e historia natural de una manera sumamente atractiva. Objetivo al que, desde ópticas convergentes, se aplican también *Robustness and Evolvability in Living Systems*, de Andreas Wagner, *Genes in Development. Re-Reading the Molecular Paradigm*, de Eva M. Neumann-Held y Christoph Rehmann-Sutter y *Evolution in Four Dimensions. Genetic, Epigenetic, Behavioral, and Symbolic Variation in the History of Life*, de Eva Jablonska y Marion J. Lamb.

El desarrollo animal comienza con la fusión del óvulo y el espermatozoide. El cigoto resultante recibe su citoplasma del óvulo, en tanto que su núcleo está compuesto a partes iguales por cromosomas paternos y maternos. De esa fusión de los gametos se originarán todos los tipos de células somáticas y nuevos gametos para la generación siguiente. Hay, pues, un momento en que las células embrionarias deben optar por diferenciarse en germen o en soma.

Durante la primera hora de oviposición, los núcleos se dividen, sin que lo haga el citoplasma. En varias divisiones rápidas, se forman numerosos núcleos que emigran hacia la superficie para dividirse varias veces más. A esta célula ingente con muchos núcleos se la denomina blastodermo sincitial. Sin la obstrucción de membrana alguna, pueden transitar libremente sus nutrientes y otras sustancias. A las tres horas de la fecundación aparecen las membranas entre los 6000 núcleos. En este estadio de blástula todas las células parecen iguales.

Pero en cuanto se inicia el proceso de gastrulación, el embrión va adquiriendo forma. Las células se distribuyen en grupos, prosiguen dividiéndose y crean los primordios de tejidos y órganos. Se empieza por la constitución de una capa celular interna, el *endodermo*, que terminará por dar origen a intestinos y estómago, una capa celular intermedia, o *mesodermo*, punto de arranque de musculatura, corazón, sangre y varios órganos internos, y, por fin, el *ectodermo*, de donde se

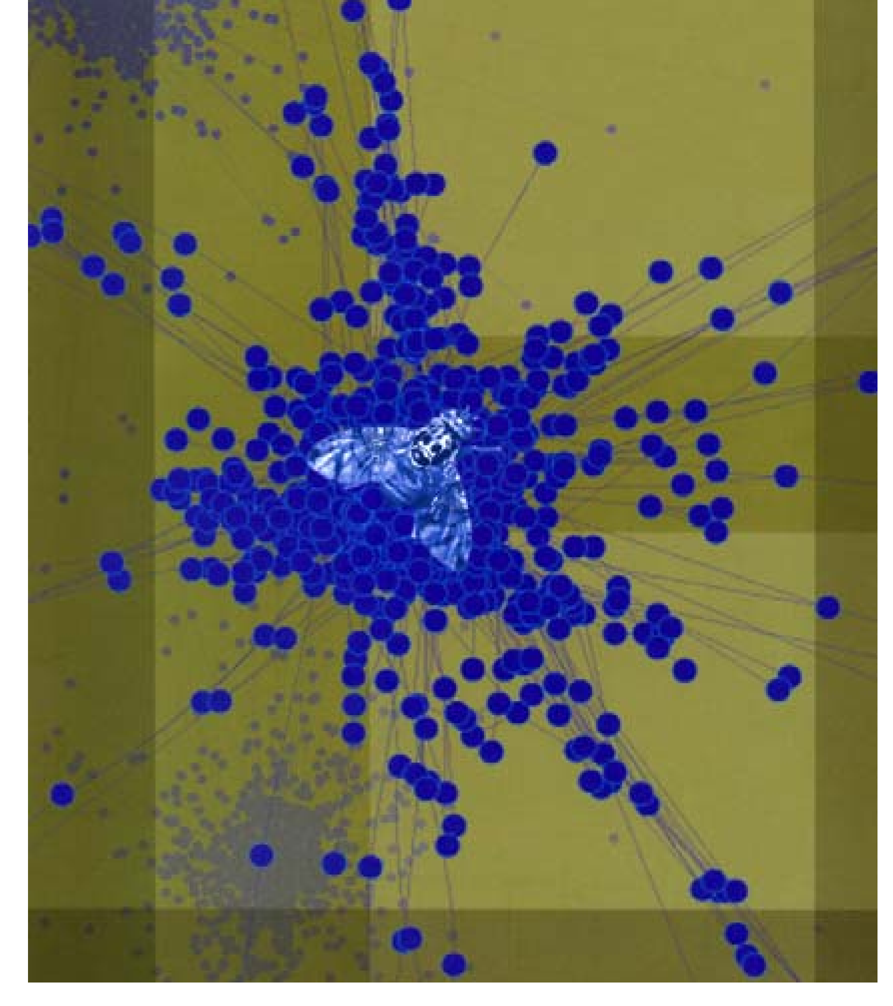
desarrollarán el sistema nervioso y la piel. Tras 24 horas embrionarias, eclosiona la larva.

El corazón de la larva se desarrolla en la región dorsal. No hay arterias ni venas. La sangre incolora, que porta los nutrientes y hormonas, circula libre por los órganos internos de la larva. El oxígeno penetra a través de las tráqueas. El sistema nervioso central de la larva consta de un cerebro y de un cordón nervioso ventral, desarrollados a partir de neuroblastos. Dentro de una pupa, la larva se metamorfosea en una mosca adulta, que a los tres días eclosiona. La hormona ecdisona dispara la metamorfosis. Las estructuras cuticulares alcanzan la diferenciación en la pupa, con la aparición consiguiente de cerdas, pelos, ojos, órganos sexuales y alas.

Durante la metamorfosis, las estructuras exteriores de la mosca no se desarrollan de las estructuras de la larva, sino de los discos imaginales, células indiferenciadas. Muchos discos se ensamblan a la manera de un rompecabezas para formar la mosca. Los discos imaginales se dan a pares, uno para el costado derecho del cuerpo y otro para el izquierdo. Hay tres pares para las seis patas, dos pares para alas y tórax, dos para la cabeza con ojos y antenas, y otros menores para partes del abdomen y la cabeza. Cada disco imaginal crece a partir de un grupo restringido de tres a 10 células precursoras, que, tras sucesivas divisiones, pueden formar capas de hasta 40.000 células.

El secreto del desarrollo embrionario se encuentra en el control de la actividad génica en el tiempo y en el espacio. De un gen decimos que está activo si se sintetiza en la célula su proteína correspondiente. Cada gen contiene una región de control en su ADN, conocido por promotor, región que se une a una enzima ARN polimerasa para iniciar la transcripción. Cerca de esta región del promotor, los factores de transcripción pueden bloquear (reprimir) o estimular (activar) la transcripción.

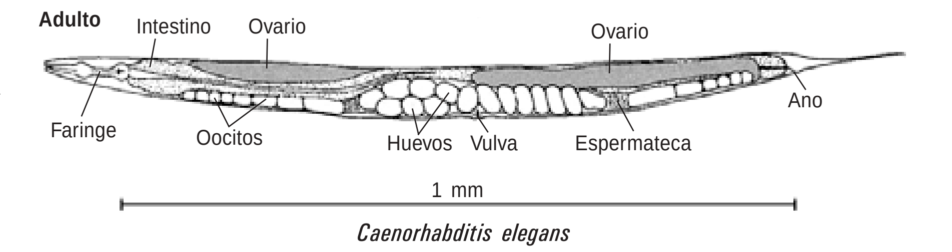
El aislamiento individual de diversos genes posibilitó la fabricación en masa de proteína en bacterias o en cultivos celulares. El análisis de la secuencia de muchas proteínas (hormonas, factores sanguíneos, enzimas, anticuerpos, etcétera) reveló que había áreas o dominios compartidos. Así, diversos factores de transcripción contenían un dominio de 60 aminoácidos que específicamente se unía al ADN. Ese dominio proteico, *homeodominio*, se descubrió en los genes homeóticos de *Drosophila*.



Macho de mosca de la fruta.

Se admite que existen en *Drosophila* unos 5000 genes necesarios para el desarrollo normal y supervivencia de la mosca. La mayoría de esos genes producen proteínas que se requieren para el crecimiento y división celulares. Pero hay un grupo restringido de genes que cumplen la función de guiar el desarrollo. Los mutantes de esos genes crean unas estructuras larvarias en un sitio equivocado, mal constituidas o simplemente no las producen. Los fenotipos evidencian una jerarquía de la función génica: los genes que se muestran activos en las fases iniciales del proceso controlan los efectos de los genes que operan en una época más tardía.

Un concepto clave en la biología del desarrollo es el de gradiente. En general, el término designa un cambio gradual de cualidad a lo largo de un recorrido, por ejemplo, la caída de temperatura con la altura de una montaña. Existen gradientes de densidad, gradientes de color o gradientes de concentración de morfógenos. Estos últimos resultan decisivos para el desarrollo. Uno de los primeros casos de gradiente morfogenético donde se comprobó que determinado resultado dependía de la concentración fue el



Caenorhabditis elegans

Máquinas medievales

Konrad Gruter von Werden: De Machinis et Rebus Mechanicis. Ein Maschinenbuch aus Italien für den König von Dänemark 1393-1424. Edición de Dietrich Lohrmann, Horst Kranz y Ulrich Alertz. Biblioteca Apostolica Vaticana; Città del Vaticano, 2006.

La obra de Konrad Gruter, el tratado sistemático más antiguo sobre mecánica y construcción de máquinas, ilumina el mundo de la técnica y la ciencia de la Edad Media tardía en su tránsito al Renacimiento. Incoa una secuencia larga de textos mecánicos que convertiría pronto esa rama de la física en la disciplina de mayor éxito. Da fe del *iter italicum* recorrido por los artesanos, maestros albañiles, músicos, pintores y escritores que, procedentes de Alemania, atravesaban los Alpes en busca de maestros.

Este elenco de 72 imágenes de máquinas resume el amplio repertorio de ingenios que hace trizas el viejo y arraigado prejuicio según el cual la mecánica llegó con Galileo y Newton. Todavía seguimos leyendo disparates y fantasías en torno a una "noche medieval", salida del magín de Ernst Mach y denostada en su *Die Mechanik in ihrer Entwicklung*, 1883. Cierto es que semejante patraña quedó exorcizada de la bibliografía especializada. La mecánica, en Europa occidental, había alcanzado rango propio en el siglo XII. En su teoría de la ciencia, o Didascalion, Hugo de San Víctor (m. 1141) reserva para la *mechanica* el saber imprescindible para desenvolverse en el mundo; la divide en siete capítulos: *lanificium*, *armatura*, *navigatio*, *agricultura*, *venatio*, *medicina* y *theatrica*, o *scientia ludorum*.

No tardó en evidenciarse la vinculación de la mecánica con la geometría. El español Domingo Gundisalvo (m. hacia 1181) retomaba de un autor árabe del siglo IX, al-Farabi, un sistema nuevo de ciencia en cuyo seno las artes fabriles —clasificadas de acuerdo con el material que transforman (madera, metales, textiles, pieles, huesos, etc.)— se asocian con la geometría y el arte de medir. Un siglo después culmina la asimilación de la mecánica árabe y se traducen, directamente del griego, los escritos de Arquímedes y Euclides. Con sorprendente celeridad se idean teorías sobre lo que, andando el tiempo, configurará la mecánica moderna: dinámica, estática y cinemática. Sirva de ejemplo del nuevo punto de partida de la estática; se nos ofrece en la doctrina de los pesos y la balanza de Jordanus de Nemore (primera mitad del siglo XIII). La cinemática, o ciencia del movimiento, alcanzó un primer momento de esplendor en las demostraciones geométricas aportadas en el tratado *De motu*, de Gerardo de Bruselas (antes de 1260). Pudieron apuntalarse con las nuevas traducciones de Euclides, Arquímedes y Aristóteles.

Predecesores inmediatos de Konrad Gruter, los calculadores mertonianos de Oxford y Nicolás Oresme en París (*ca.*1322-1382) empezaron a resolver a través de métodos matemáticos la mayoría de los problemas cinemáticos. Albert von Sachsen (*ca.*1316-1390) llevó a Alemania la nueva física que enseñaba en París. En Italia sobresale Blasius de Parma (m. 1416), quien refleja la nueva corriente en su tratado *De ponderibus*.

Como telón de fondo de ese arco temporal que comprende los siglos XII-XIV, el desarrollo de la técnica coincide con la fundación de las universidades y la sistematización de una ciencia occidental frente al mundo árabe, con la construcción de catedrales, puentes, canales, ciudades, carros y barcos. Con la recepción de una nueva estática. No deja, sin embargo, de resultarnos sorprendente que sólo conozcamos tres o cuatro autores cuyos manuscritos puedan considerarse no ya manuscritos ingenieriles, sino al menos manuscritos técnicos. Recordaremos el arquitecto Villard de Honnecourt (primera mitad del siglo XIII), el médico italiano Guido de Vigevano y el inglés Walter de Milemete (ambos de la primera mitad del siglo XIV). De principios del siglo XII fue el monje Theophilus.

Por otro nombre Roger, sabemos con cierta seguridad que Theophilus vivió *ca.* 1070-1125, en la diócesis de Paderborn. Su *Schedula diversarum artium* constituye una suerte de manual donde se compilan procesos técnicos y artísticos que se basan en la práctica de los artesanos y artistas. Arquitecto de amplios intereses, incluida su afición por las máquinas, fue Villard de Honnecourt (*fl.* en 1235). Walter de Milemete, clérigo al servicio del monarca inglés, redactó en 1327 *De nobilitatibus, sapientiis et prudentiis regum*, un manuscrito ilustrado sobre el arte de la guerra, donde aporta una de las primeras informaciones sobre la pólvora. Por fin, Guido de Vigevano, que contó entre sus pacientes al emperador Enrique VII y la reina Juana de Bur-

gradiente "bicoid" de *Drosophila*. El *bicoid* pertenece a un grupo de genes maternos que son responsables de la formación del patrón anterior del embrión. Si el gen *bicoid* es defectivo, el embrión carecerá de las estructuras de la mitad frontal del embrión. La proteína "bicoid" es un factor de transcripción que contiene un homeodominio, que se enlaza con los promotores de diversos genes de segmentación; entre ellos, el promotor del gen *hunchback*.

A través de la acción de bicoid, el gen *hunchback* se transcribe en los núcleos de la mitad anterior del huevo. Si falta la proteína bicoid, queda inactivo el gen *hunchback*. En general, los gradientes maternos regulan la transcripción de genes de segmentación cigóticos a lo largo del eje anterior-posterior. En última instancia, la subdivisión del embrión a lo largo del eje dorsal-ventral depende de un solo gradiente materno, el gradiente dorsal.

La región de la codificación génica para el homeodominio se denomina "homeobox". Las regiones en las cuales esos genes *Hox* se reprimen o activan aparecen definidas en una fase precoz del desarrollo a través de la interacción entre genes de segmentación. Los genes *Hox* se han encontrado en versiones modificadas de todos los animales estudiados, incluso en gusanos no segmentados. El descubrimiento de los genes *Hox* constituyó la primera prueba sólida de la existencia de un mismo plan básico para animales de grupos muy diversos, tales como *Drosophila* y el ratón. Una semejanza que se funda en genes homólogos, surgidos en el curso de la evolución a partir de un antepasado común.

En los últimos tiempos, ha recorrido un camino paralelo el estudio de la biología del desarrollo de *Caenorhabditis elegans*, nemátodo de piel lisa y forma de cilindro alargado, sin segmentar. Existen variedades parasitarias y de vida libre; medran en medios acuáticos y terrestres. Hay dos formas sexuales: individuos hermafroditas autofecundantes e individuos machos.

gundia, nos dejó, en un tratado de medicina, páginas sobre las máquinas de guerra.

Nuestro autor, nacido en Uverdena (Werden), en la cuenca del Ruhr, permaneció al servicio del papa Bonifacio IX desde 1393 hasta 1400. (En Italia residió hasta 1425.) Fue uno de los 413 alemanes de la curia. Formado en la Universidad de Colonia y especialmente habilidoso en bombas pneumáticas, elevación de aguas y construcción de pozos, se le adscribió al *officium aquae*, donde debía velar por la potabilidad del agua y de su abastecimiento. En 1367, se había construido un acueducto para derivar la Aqua Traiana hasta la sede papal, proyecto en el que trabajaron los expertos alemanes "Gauzelin, Berthold, Johannes y Konrad".

A Gruter le interesa la física aristotélica del movimiento continuo (*motus continuus*), controvertida en su tiempo y que él se propuso demostrar con una rueda sin fin, sobre la que diserta por extenso. Construyó modelos diferentes; en uno, por ejemplo, ser sirvió de 12 imanes y clavos de finísima calidad (*acus nobiles*); en otro, de madera nobilísima (*lenis, laevis, subtils*). Para una tercera rueda trabajó con pesos, taladros, abrazaderas metálicas para recorrer un círculo de siete pasos; en un cuarto modelo de rueda se segmentaba en 24 partes. Con esas ruedas de movimiento continuo guarda cierta analogía su labor en torno al *fluxus continuus*. Lo que no era fácil, pues el levantamiento de aguas hasta un lugar más alto debía llevarse por un medio continuo contra la gravedad. Tras su estancia romana, Gruter buscó fortuna en distintas cortes italianas. Pasó los seis años inmediatos entre Módena, Ferrara y Padua. En 1406 ingresa en el palacio de Varano de Rodolfo III. En todos esos lugares aprendió las creaciones de los artesanos, maestros e ingenieros, que describiría en su texto, y dejaba su propio sello constructor de obras hidráulicas, habilidad cuyo reconocimiento traspasaba fronteras. En 1418 Paolo Guinigi, señor de Lucca, requirió sus servicios para ese menester.

El tratado que ahora se presenta en depurada edición crítica se terminó después de 1423. Cuenta en el prefacio que se consagró al estudio de las artes mecánicas. El principio físico sobre el que descansa la obra es la distinción entre movimiento natural y movimiento violento: "todo grave se mueve hacia abajo y todo sutil hacia arriba, a menos que opere un movimiento violento, como cuando lanzamos un proyectil". Se aprecia en la redacción una voluntad de ordenación sistemática de la materia, repartida en una triple fragmentación. En la primera se abordan las distintas formas de conducción y elevación del agua, es decir, de las máquinas



para el direccionamiento y elevación por bombeo del agua (*de aquarum conductibus*). Con movimiento natural cursa el agua en sifones o fuentes. Por métodos violentos se impulsa la corriente controlada por émbolos, fuelles, rueda hidráulica con cangilones o bombas.

La segunda parte se ocupa de la construcción de distintas clases de molinos (*de molendinis diversorum modorum construendis*) y de las ruedas que los mueven: "Acabada la primera parte sobre la conducción de agua, comienza la segunda sobre la composición de diversas ruedas de moler y otros ingenios rotatorios". Se pasa revista a las ruedas de movimiento continuo aludidas, molinos navales, molinos colgantes, molinos de vientos, molinos de acción manual y otros. En la tercera parte encontramos una mezcla de ingenios (*diversorum mixtorum processu*) y, en particular, los relacionados con el arte militar: puentes, escalas e instrumentos de ataque que recibían el nombre común de claves. "Concluida la segunda parte empieza la tercera sobre puentes, escalas, claves y otras máquinas violentas de carácter ofensivo o defensivo". Una guía pormenorizada de pontones ingeniosos (para el paso de las caballerías, sobre botes, sobre tablones, de cajas para remansadas), escaleras articuladas y de tipos y funciones diversas, barcazas de piel o de cajas, llaves para descerrajar, mazas con formas especiales para romper rejas, alicates con dientes de sierra para cortar hierro, prensas y fórceps, bombardas, cañones, pértigas. Añádase que la obra vaticana se nos entrega con un aparato crítico depurado.

—*Luis Alonso*

Su talla mínima y sus exiguas exigencias nutritivas facilitan el cultivo en el laboratorio, sobre placas de agar con siembra bacteriana (*Escherichia coli*). Se caracteriza por un ciclo biológico celerísimo: tarda unos tres días desde el momento en que un joven adulto comienza a poner huevos hasta que se ha desarrollado la generación siguiente y comienza a poner sus propios huevos.

El desarrollo de *C. elegans* procede a través de una fase de embriogénesis, cuatro estadios larvarios (denominados 11, 12, 13 y 14) y un estadio adulto. Cada hermafrodita puede producir una progenie de hasta 300 individuos. Aparte de su fácil mantenimiento, tamaño pequeño y reproducción rápida y plena, *C. elegans* ofrece otras muchas ventajas que lo han convertido en excelente sistema modelo para los biólogos modernos. Embriones, larvas y adultos son transparentes, lo que permite identificar sus tipos celulares.

Sabemos que el animal hermafrodita adulto tiene unos 959 núcleos celulares somáticos y que el macho consta de 1031. Esas células pueden clasificarse en unos 150 tipos celulares distintos. La mayor complejidad se halla en las células del sistema nervioso, que consta de 302 neuronas y 56 células gliales y células asociadas en los hermafroditas; y 381 neuronas y 92 células gliales y células asociadas en los machos. Se entiende así por qué exhibe un amplio repertorio de conductas que le permiten sobrevivir y propagarse. El tamaño del genoma haploide de *C. elegans*, es decir, la contribución de un progenitor, es pequeña: consta de 100 millones de pares de bases distribuidas en cinco autosomas (es decir, cromosomas "regulares" no implicados en la determinación del sexo) y un cromosoma X.

C. elegans tiene más de 85 genes homeobox. En el nemátodo, el gen *ceh-14* (*ceh* remite a homeobox de *C. elegans*) pertenece a la clase LIM de genes homeobox. Esta clase de genes tiene dos dominios, llamados LIM, curso arriba del homeodominio.

—Luis Alonso

Jeffrey D. Sachs

Vencer a la extrema pobreza no requiere mucho tiempo

Adoptando ahora las medidas precisas, los más pobres de entre los pobres podrían emprender por sí mismos el camino hacia la productividad y la salud

Alrededor de mil millones de personas viven en la extrema pobreza. Las graves penurias económicas que sufren les suponen una lucha diaria por la supervivencia. A veces se define la pobreza extrema como vivir con menos de un dólar diario. Con mayor rigor designa la falta de acceso fiable a las necesidades básicas: una alimentación aceptable, servicios básicos de salud, agua potable y conexión con el mundo exterior por medio de carreteras, energía eléctrica y telecomunicaciones.

La ortodoxia reciente sostiene que la extrema pobreza es el resultado de la corrupción, la mala administración y la debilidad de las instituciones. Habida cuenta de que mejorar las instituciones lleva un tiempo considerable, se sigue que salir de la extrema pobreza requiere decenios. Sin negar el beneficio de contar con unas instituciones más fuertes, considero que centrarse excesivamente en las reformas institucionales ha llevado a una secuencia de medidas más equivocada que acertada. Con frecuencia, las ayudas directas han logrado reducir espectacularmente la pobreza extrema en sólo unos años.

La causa inmediata de la extrema pobreza reside en la carencia de herramientas básicas para alcanzar una productividad adecuada. El término "herramientas" debería interpretarse ampliamente, para incluir no sólo la maquinaria y el conocimiento necesario para la producción, sino también insumos agrícolas, hospitales, medicinas, escuelas y agua potable. Los países ricos pueden ayudar a los países pobres, incluso a aquellos con instituciones débiles, a disponer de estos medios en muy poco tiempo. El resultado sería un salto notable en la productividad, con el consiguiente aumento de los ingresos de las familias y el inicio de un crecimiento económico que se alimentaría por sí mismo.

Consideremos el caso de la producción agrícola. Los agricultores africanos pobres cosechan alrededor de una tonelada de grano de cereal por hectárea, aproximadamente un tercio de la media del rendimiento de otros países en vías de desarrollo. Su baja productividad refleja la falta de abonos, de semillas mejoradas y de una gestión adecuada del agua a pequeña escala. Los agricultores, muy pobres, no pueden adquirir estos recursos, ni aportar garantías para pedir préstamos. Por lo tanto, plantan lo que tienen disponible, su producción es insuficiente y siguen siendo demasiado pobres para comprar mejores recursos o diversificar la producción.

Pero si se concedieran subsidios a los agricultores pobres durante algunos años para que mejoraran sus insumos e incrementaran así el rendimiento y diversificaran la producción, y si se reinvirtieran los ingresos adicionales que resultarían de ello en el campo y en la comunidad, pasarían dos cosas. La primera, que persistiría el incremento de la productividad agrícola aun cuando ya no hubiese subsidios. La segunda, que las familias acumularían riqueza suficiente para ofrecerla como aval en la compra de mejor utillaje, o para costearlo directamente. Una ayuda temporal puede poner a los agricultores en el camino del crecimiento a largo plazo. No es una hipótesis. Aconteció durante la Revolución Verde de Asia.

Aconteció durante la Revolución Verde de Asia.

En la práctica, lo que importa es la interrelación de un conjunto de técnicas que se pueden proporcionar simultáneamente: insumos agrícolas, servicios sanitarios, agua potable, letrinas, ordenadores y capacitación para usarlos, vehículos de motor para uso de las aldeas, suministro de electricidad dentro y fuera de la red de distribución, y carreteras adaptadas a todo tipo de meteorología. Como estas intervenciones son de bajo coste y profundo alcance, podrían acometerse en las regiones más pobres del mundo con un coste que no excedería del prometido 0,7 por ciento del producto interior bruto de los países ricos.

El Proyecto Aldeas del Milenio, una sociedad mixta público-privada, ha comenzado a aplicar ese conjunto de medidas en diez países africanos. Con éxito. Tales intervenciones pueden extenderse rápidamente por la nación. Campañas de vacunación, distribución masiva de mosquiteras, campaña nacional de desparasitación, complementos vitamínicos, vales para semillas y abonos, bombas a pedales para el riego, gratuidad de escuelas y hospitales, capacitación masiva del personal sanitario local: todo ello se está difundiendo por Africa con buenos resultados.

Pero esta ampliación de la ayuda sigue teniendo unos fundamentos frágiles debido a lo limitado e imprevisible de las donaciones. Los Objetivos de Desarrollo del Milenio, patrocinados por la ONU para combatir la pobreza, el hambre y las enfermedades de los más depauperados entre los pobres hasta 2015, son todavía alcanzables. Conseguiríamos grandes resultados atrayendo donaciones suficientes y destinándolas a dotar a los beneficiarios mismos de medios prácticos para acabar con su pobreza.

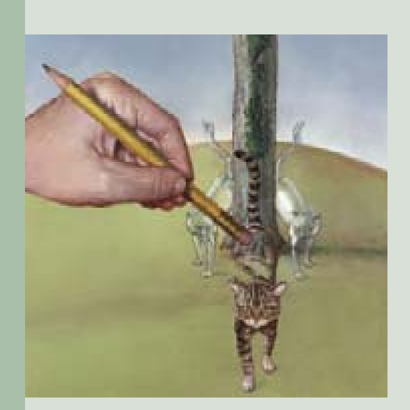
Jeffrey D. Sachs es director del Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia



METANO EN MARTE Y TITAN, por Sushil K. Atreya

¿Constituye un indicio de vida? ¿O quizá de una actividad geológica desconocida? La presencia de metano en la atmósfera de Marte y Titán plantea una de las incógnitas más sugerentes de nuestro sistema solar.





BORRADOR CUANTICO DOMESTICO, por Rachel Hillmer y Paul Kwiat

Se puede realizar en casa un experimento que evidencia uno de los efectos más extraños de la mecánica cuántica.



MICROORGANISMOS HALOFILOS, por Shiladitya DasSarma

Los microorganismos que medran en medios salinos sacan a la luz los caracteres unificadores de la vida y los secretos moleculares de la supervivencia en condiciones extremas.

NANOMECANICA DE PROTEINAS, por Mariano Carrión Vázquez

La célula posee numerosos complejos proteínicos que operan como verdaderas máquinas, con auténticos motores y muelles que trabajan en un entorno que nos es poco familiar.

MAMIFEROS DESAPARECIDOS DE SUDAMERICA, por John J. Flynn, André R. Wyss y Reynaldo Charrier

Los fósiles recién descubiertos en los Andes chilenos nos hablan de mamíferos únicos que antaño vagaban por Sudamérica. Tales hallazgos están cambiando las ideas existentes sobre la historia geológica del continente.

